

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2012

David Buček

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Aplikace vláknově-optických senzorů ve stavebním průmyslu

Application of optical-fiber sensors in construction industry

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. David Buček

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Aplikace vláknově-optických senzorů ve stavebním průmyslu
Application of optical-fiber sensors in construction industry

Zásady pro vypracování:

1. Přehled a základní principy vláknově-optických senzorů.
2. Optovláknové distribuované systémy.
3. Návrh aplikace Raman-DTS do stavebního průmyslu.
4. Ověření navržených aplikací Raman-DTS ve stavebním průmyslu.

Seznam doporučené odborné literatury:

LONG, Derek A. *The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules*. West Sussex, England: John Wiley & Sonc Ltd, 2002. 597 s. ISBN 978-0-471-49028-9.

LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. West Sussex, England: John Wiley & Sonc Ltd, 2002. 795 s. ISBN 0-471-82053-9.

CHOMYCZ, Bob. *Fiber optic installer*. Two Penn Plaza, New York: McGraw-Hill, 2000. 307 s. ISBN 0-07-135604-5.

YIN, Shizhuo; RUFFIN, Paul B.; YU, Francis T. S. *Fiber Optic Sensors*. Second Edition. Broken Sound Parkway NW: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. 477 s.

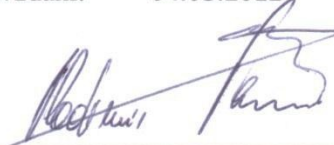
DADO, Milan; TUREK, Ivan; ŠTELINA, Julius, et al. *Kapitoly z optiky: pre technikov*. Žilina: Žilinská univerzita, 1998. 348 s. ISBN 80-7100-390-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 3. 5. 2012



.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Koudelkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat laboratoři stavebních hmot a laboratoři tepelných vlastností, reologie a koroze stavebních materiálů, projektu ICT - Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin (CZ.1.05/2.1.00/03.0082).

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá aplikací vláknově-optických senzorů ve stavebním průmyslu. V úvodu práce je popsán přehled a základní principy optických senzorů. Jsou popsány technologie používané ve stavebním průmyslu. Následuje popis jevů, které se využívají při měření v optických vláknech a v senzorech. Je popsáno použití optického vlákna v bodovém režimu. Je vyhodnoceno měření na optických vláknech pro konstrukci a návrh optického senzoru. Na základě měření je navržen optický senzorický systém a je popsána jeho konstrukce. Navržený senzorický systém je použit pro měření průběhů teplot při hydrataci betonu. Změřená data jsou zpracována programem Matlab a je popsán postup zpracování dat. Zpracovaná data jsou vyhodnocena.

Klíčová slova

Optický senzor, senzorický systém, bodový režim, stavební průmysl, hydratační teplo, beton, Matlab

Abstract

This thesis is concerned with the application of fiber-optic sensors in the construction industry. In the introduction part there is described an overview with the fundamental principles of the fiber-optic sensors. Technologies used in the construction industry are also covered at the beginning. Then the following chapter contains description of the effects used in fiber-optics and sensors measure. Also usage of the fiber-optics in the scatter mode is described. Measurement of the fiber-optics for the construction and design optical sensor is evaluated. Based on this measurement the optical sensor system was designed with the proper description of his construction. Designed sensor system is then used for measurement of the temperature course during concrete hydration. Received figures are then processed by the Matlab application and the procedure of data processing is described. Processed figures are then evaluated.

Keywords

Optical sensor, sensor system, point mode, construction industry, heat of hydration, concrete, Matlab

Seznam použitých symbolů a zkratek

VVN	velmi vysoké napětí
DTS	Distribution Temperature System
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
ITU-T	International Telecommunication Union
LPR	Landau-Placzek Ratio
A	útlum
Q_i	ztrátový tepelný tok
Q_{hyd}	intenzita vývinu hydratačního tepla
m	hmotnost
t	teplota
c_s	měrná tepelná kapacita
τ	čas
t_i	teplota zkušební vzorku
t_e	teplota okolí
V_i	vstupní signál
V_o	výstupní signál
λ	vlnová délka
i_0	intenzita světla rozptýleného jednou částicí
θ	úhel
I_0	celková intenzita dopadajícího záření
ϵ_0	permitivita vakua
α	polarizovatelnost částice
α_R	přídavný útlum
L	délka vlákna
y_R	měrná hodnota Rayleighova rozptylu
n	index lomu materiálu
p	střední hodnota foto elastického koeficientu

β_C	koeficient izotermické stlačitelnosti
T_F	fiktivní teplota
K	Boltzmannova konstanta
E	intenzita elektrického pole
μ_i	indukovaný dipól
r	výchylka vibrací
R_0	amplituda rozkmitu
ν_{vib}	frekvence
P_R	prahová hodnota navázaného optického výkonu
d	průměr vlákna
α_{dB}	útlum vlákna
$\delta\lambda$	šířka zdroje světla
E_F	energie jednoho fotonu
ω_F	úhlová rychlost světelné vlny
\hbar	redukovaná Planckova konstanta
E_A	akustická vlna
ω_A	úhlová rychlost světelné vlny
C_S	konstanta Stokesovy složky
C_{AS}	konstanta anti-Stokesovy složky
k	Boltzmanova konstanta
I_S	intenzita Stokesovy části spektra
I_{AS}	intenzita anti-Stokesovy části spektra
$2\pi\Omega$	červený a modrý posuv ve frekvenci
$T(z)$	úroveň teploty v bodě z
T_{REF}	referenční teplota
β_T	isotermická stlačitelnost
ρ	hustota materiálu
v_a	akustická rychlost

$\zeta(\varepsilon)_{Td}$	Brillouinův přenos
k_p	vlnový vektor rozptýleného světla
γ	fáze relativní fáze
o	obvod
d	průměr
n_z	počet závitů
l_s	délka vlákna v senzoru

Obsah

1.	ÚVOD	1
2.	TECHNOLOGIE POUŽÍVANÉ VE STAVEBNICTVÍ	2
2.1.	Složení betonu.....	2
2.1.1.	Kamenivo	2
2.1.2.	Voda	2
2.2.	Cement	3
2.2.1.	Přísady	3
2.3.	Hydratace cementu.....	3
2.4.	Měření hydratačního tepla	4
2.4.1.	Metody adiabatické.....	5
2.4.2.	Metody izotermické	5
2.4.3.	Metody izoperibolické	5
2.5.	Měření mikro kalorimetrem TAM Air.....	6
3.	PŘEHLED A ZÁKLADNÍ PRINCIPY VLÁKNOVĚ-OPTICKÝCH SENZORŮ	8
3.1.	Rozdělení podle typu měřené veličiny.....	8
3.2.	Rozdělení senzoru podle orientace v prostoru	9
4.	LINEÁRNÍ A NELINEÁRNÍ ROZPTYL	10
4.1.	Rayleighův rozptyl.....	10
4.2.	Mieho rozptyl.....	11
4.3.	Ramanův rozptyl.....	12
4.4.	Brilouinův rozptyl.....	14
5.	OPTOVLÁKNOVÉ DISTRIBUOVANÉ SYSTÉMY	17
5.1.	Princip činnosti Raman DTS	18
5.2.	Brillouin DTS.....	20
6.	VYUŽITÍ DISTRIBUOVANÉHO SENZORU V BODOVÉM REŽIMU.....	22
6.1.	Určení minimální délky optického vlákna v senzoru.....	22
6.2.	Určení minimálního průměru senzoru	24
7.	NÁVRH APLIKACE NA BÁZI OPTOVLÁKNOVÉHO RAMAN DTS	27

7.1. Návrh a konstrukce senzoru	27
7.2. Postup pro vytvoření meandrového pole	29
7.3. Měření útlumu.....	32
7.3.1. Měření pomocí OTDR.....	32
7.3.2. Měření přímou metodou	33
7.4. Kalibrace Raman DTS	34
7.5. Kalibrace meandrových polí	35
8. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ V PRAXI.....	42
9. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT PROGRAMEM MATLAB	45
9.1. Načtení dat	45
9.2. Definování délky polí a zpracování dat	45
9.3. Řezy matic	47
9.4. Vykreslení a uložení dat.....	48
9.4.1. Vykreslení a uložení jedné matice.....	48
9.5. Vykreslení a uložení matic všech polí do jednoho souboru.....	49
9.5.1. Vykreslení teploty polí	50
10. ZÁVĚR	52
LITERATURA.....	53
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	55
SEZNAM TABULEK.....	57
SEZNAM PŘÍLOH NA DVD	58

1. Úvod

Optická vlákna byla vyvíjena jen pro datový přenos informace. Vývojem v oblasti optických technologií se přišlo na to, že optická vlákna mohou být obecně použita jako senzory ve velmi rozmanitých odvětvích a oborech. Mohou být použita pro měření teploty, tlaku, mechanického napětí, detekci chemikálií atd.

Použití optovláknových senzorů nám poskytuje celou řadu výhod. Díky konstrukci z optických vláken, která jsou skleněná nebo plastová, a díky principu snímání, jsou tyto systémy odolné proti elektromagnetickým interferencím. Senzory na bázi optických vláken se dnes používají v různých odvětvích, v energetice (monitorování teploty vinutí transformátorů a profilu teploty podél kabelů VVN), ve stavebnictví (monitorování teploty, mechanického napětí) v tunelech, ve vrtech, v pozemním stavitelství (monitoring integrity přehrad a hrází) a v průmyslu (monitoring úniků medií na produktovodech, monitorování integrity produktovodů) při sledování průmyslových procesů, kde se nejčastěji využívají pro měření teploty [1, 2, 3].

Jedním z jevů, který se v oblasti sensoriky využívá, je nelineární rozptyl. Tento rozptyl se dále dělí na Ramanův a Brillouinův. Ramanův rozptyl je jev, který vzniká při interakci mezi fotony dopadajícího světla s vibračními a rotačními stavy atomů nebo molekul, kdy rozptýlené záření má jinou vlnovou délku než dopadající záření.[4, 5].

Cílem této diplomové práce je implementace optovláknových DTS systémů s využitím Ramanova nelineárního jevu do stavebnictví. Provést experimentální měření průběhu teplot při hydrataci v betonu. Zpracovat naměřená data pomocí programu Matlab.

2. Technologie používané ve stavebnictví

Beton je nerozšířenějším stavebním materiálem. Je to kompozitní stavební látka, ve které kamenivo plní funkci plniva a pojivo je druhou fází kompozitu sestávající z hydratované maltoviny a pórů.

Vlastnosti betonu jsou funkcí času a tato závislost je sledována ve třech horizontech:

- čerstvý beton tuhne a tvrdne v měřítku hodin, proto musí být rychle zpracován,
- pevnosti betonu se stanovují až za 28 dní po zamíchání čerstvého betonu,
- tvrdnutí betonu probíhá trvale. Za přirozené teploty a vlhkosti tvrdne měsíce.

Přesné definování vlastností betonu jako funkce jeho složení naráží na problémy, které jsou vyvolané mnohoznačnou závislostí vlastností na složení a technologii betonu. Existuje více než dvacet nezávislých proměnných, které se projevují na pevnosti betonu. Některé proměnné jsou časově závislé. Cementový kámen, který se skládá ze zatvrdnutého cementového tmelu, kamenivo a vodu, nelze považovat za homogenní. Rozložení zrn kameniva je náhodné. Dávkování složení je prováděno s určitou tolerancí [6].

2.1. Složení betonu

Základními složkami betonu jsou: kamenivo, cement a voda. Doplnkovými složkami jsou přísady a příměsi.

2.1.1. Kamenivo

Objem 75 až 80 % zaujímá kamenivo. Jeho hlavní funkcí je tvorba pevné kostry s minimálními mezerami. Kamenivo proto obsahuje různě velká zrna ve vhodném poměru. Kamenivo je přírodní nebo umělá anorganická zrnitá látka, určená pro stavební účely. Velikosti zrna do rozměru 125 mm. Kameniva dělíme podle původu, velikosti zrna, vzniku a podle pórovitosti.

Drcené kamenivo vzniká drcením lomového kamene. Těžené kamenivo vzniká při přirozeném rozpadu horniny. Zrna mají zaoblené tvary, které vznikají při transportu takto zvětřaných hornin. Rozdrcené kamenivo obsahuje 40 až 80 % drcených zrn, zbývající jsou přirozeně zvětřalá zrna.

2.1.2. Voda

Voda v betonářství plní dvě hlavní funkce a to hydratační a reologickou. Voda podmiňuje hydrataci cementu. Spolu s cementem vytváří tuhou strukturu cementového kamene. Minimální potřeba vody na hydrataci cementu je 23 až 25 % hmotnosti cementu. Druhá funkce je reologická, která nám

umožňuje tváření čerstvého betonu s jeho dalšími složkami. Kapilárními silami je zajišťována koheze a viskozitou plastičnost a tvárnost čerstvého betonu.

2.2. Cement

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Po smíchání s vodou postupně tuhne a tvrdne. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost ve vodě. Hydraulické tuhnutí je důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů.

Tab. 1: Druhy cementu [6].

Druh cementu	Název cementu	Označení	Obsah složek v % hmotnosti		
			slinek	složka	plnivo
I.	portlandský	I	95-100	-	0-5
II.	portlandský směsný	II/A-X	80-94	6-20	0-5
		II/B-X	65-79	21-35	0-5
III.	vysokopeční	III/A	33-64	36-65	0-5
		III/B	22-34	66-80	0-5
		III/C	5-195	81-95	0-5
IV.	purolánový	IV/A	65-89	11-35	0-5
		IV/B	45-64	36-55	0-5
V.	směsný	V/A	40-64	18-30	0-5
		V/B	20-39	30-50	0-5

2.2.1. Přísady

Jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během míchání do betonu v množství do 5 % hmotnosti cementu. Přidávají se za účelem změny vlastností čerstvého nebo ztvrdlého cementu. Přísady dělíme podle fyzikálně-chemického působení na:

- látky měnící kinetiku hydratace cementu, změnou rozpouštění slitkových materiálů,
- povrchově aktivní látky, které se absorbují do povrchu zrn cementu.

2.3. Hydratace cementu

Hydratace cementových pojiv je exotermická reakce, při které dochází k hydrataci cementu po smíchání slínku s vodou. Hydratace cementu jsou chemické děje probíhající při tuhnutí a tvrdnutí cementového mléka, malty, kaše či betonu.

Po smíchání s vodou dochází k hydrataci původně bezvodých minerálů za vzniku hydratačních produktů. Dochází postupně ke tvorbě krystalů a pevných vazeb v cementové směsi.

Hydratační reakce cementu jsou provázeny vývinem tepla. Intenzita vývinu hydratačního tepla je úměrná rychlosti probíhajících reakcí v závislosti na chemicko-mineralogickém složení cementu, přítomnosti aktivních přísad a okolních podmínkách. Uvolňování tepla závisí na složení cementu ze slitkových minerálů tab. 2.

Tab. 2: Hydratační tepla slínekových nerostů [7].

Slínekový minerál	Mezní hodnoty [kJ.kg ⁻¹]
C ₃ A	800-1280
C ₃ S	380-540
C ₄ AF	120-440
C ₂ S	90-110
CaO	1116
MgO	812

Hydratace cementu se rozděluje do tří period. Každá z period se vyznačuje jiným stupněm reakce slínku s vodou.

- První perioda se nazývá indukční. Rozděluje se ještě na dvě období, první před indukční, které trvá maximálně 15 minut. Zde dochází ke smáčení zrn cementu a k prvním reakcím se slínekovým materiálem. Dochází k rychlému uvolňování tepla. V druhém indukčním období dochází k pomalému uvolňování hydratačního tepla, roste viskozita, začíná tuhnout cement. Tvoří se zárodky krystalů. Druhé období trvá 1 až 2 hodiny od zamíchání betonu. Pevnost v tlaku je menší než 100 kPa.
- V druhé periodě se přechází do tuhého skupenství. Je urychlujícím stupněm hydratace. Trvá od 1 - 2 do 12 – 24 hodin po zamíchání betonu. Alit - C₃S rychle reaguje. Zrna cementu se k sobě přibližují, prorůstají krystaly hydratačních produktů. Vytváří se mikrostruktury cementového kamene. Pevnost v tlaku 1 až 20 MPa.
- Třetí perioda je nazývána stupněm pevné struktury. Snižuje se vývin tepla. Třetí fáze hydratace (decelerační) pak může trvat i několik let a je možné ji rozdělit opět do dvou částí, přičemž ve druhé části, zhruba po 28 dnech, začíná cementová pasta „dozrávat“, což se vyznačuje rekrystalizací fází v prostoru mezi zrny cementu [6].

2.4. Měření hydratačního tepla

Stanovení hydratačního tepla u silikátových pojiv je možné měřit dvěma základními metodami:

- přímé metody: vychází ze sledování změny teploty zkušební vzorku za přesně definovaných okrajových podmínek,
- nepřímé (rozpouštěcí) metody: hydratační teplo je stanoveno z rozpouštěcího tepla hydratovaných zkušebních vzorků (po 7 a 28 dnech) ve směsi kyselin [7].

Metody nepřímé jsou relativně velmi přesné, ale lze jimi pouze stanovit celkovou hodnotu hydratačního tepla v jistém stádiu hydratace. V případě, že se tímto způsobem zjišťuje hydratační teplo u ne zcela hydratovaného vzorku, je nutné zkušební vzorek promýt etylalkoholem a vysušit. Tímto postupem lze tedy teoreticky stanovit celkové hydratační teplo u zkušební vzorku v různém stádiu hydratace. Ze zjištěné závislosti lze interpolovaně stanovit křivku průběhu intenzity vývinu hydratačního tepla. Tento postup je empiricky značně náročný.

Pomocí nepřímých metod naopak sledujeme dynamické veličiny, které jsou přímo úměrné intenzitě vývinu hydratačního tepla. Celkovou hodnotu uvolněného hydratačního tepla poté můžeme stanovit integrací této intenzity. Existují tři nejpoužívanější typy nepřímých metod:

2.4.1. Metody adiabatické

Při měření nedochází k výměně tepla mezi zkušebním vzorkem a okolním prostředím. Platí:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (1)$$

potom lze hodnotu intenzity hydratačního tepla definovat pomocí vztahu:

$$Q_{hyd} = \frac{1}{\tau} \Delta t m c_s \quad (2)$$

Tato metoda je však obecně považována za velmi nepřesnou a málo vypovídající, neboť během měření dochází vlivem uvolňování hydratačního tepla k enormnímu zahřátí zkušební vzorku často až k teplotám 100 °C. Tím dochází k silnému urychlení reakční kinetiky, proto se naměřené hodnoty průběhu vývinu hydratačního tepla silně odlišují od reálných průběhů.

2.4.2. Metody izotermické

U této metody je zkušební vzorek temperován na jistou konstantní teplotu a je měřen tepelný tok mezi zkušebním vzorkem a okolním prostředím. Vzhledem k tomu, že změna teploty zkušební vzorku je rovna nule, pak:

$$\frac{1}{\tau} \Delta t m c_s = 0, \quad Q_{hyd} = - \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3)$$

2.4.3. Metody izoperibolické

Hydratace zkušební vzorku probíhá za přesně definovatelných podmínek, které jsou podobné podmínkám, při jakých hydratuje betonová směs na stavbě v praxi. Pomocí tohoto postupu je

například možné velmi objektivně stanovit vliv přísad a příměsí na průběh vývinu intenzity hydratačního tepla u betonu. Zkušební vzorek hydratuje v kalorimetru, u něhož je známá přesná tepelná charakteristika:

$$Q_i = f\left(\frac{\partial(t_e - t_i)}{\partial \tau}\right), \quad (4)$$

potom lze pro intenzitu vývinu hydratačního tepla definovat vztah ve tvaru:

$$Q_{hyd} = \frac{1}{\tau} \Delta t m c_s - \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (5)$$

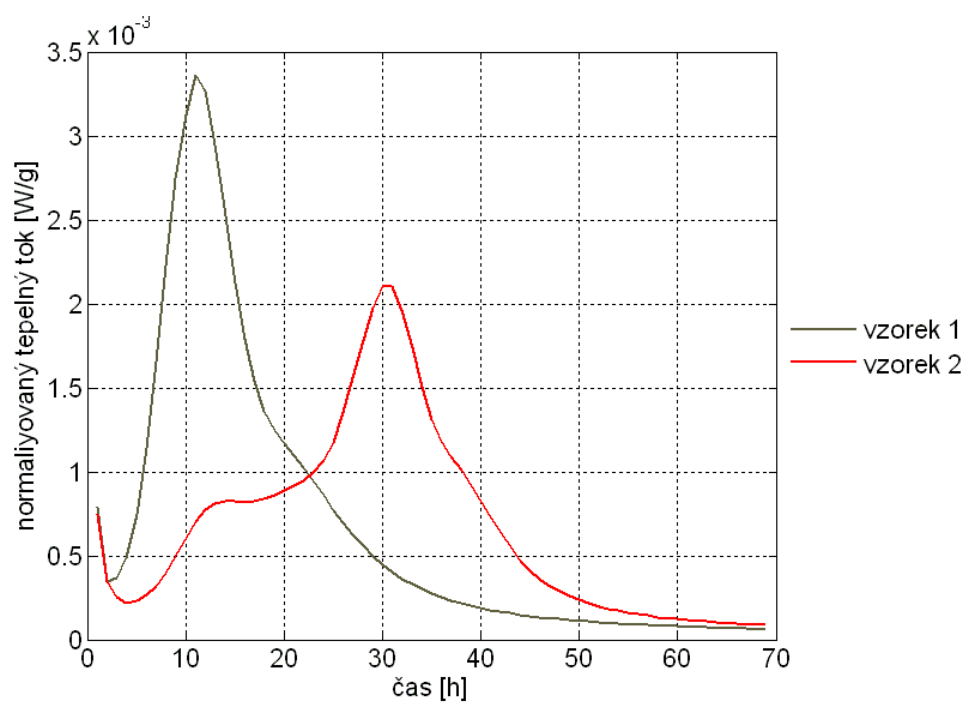
kde Q_{hyd} je intenzita vývinu hydratačního tepla [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$], Δt je změna teploty zkušební vzorku [K], m je hmotnost zkušební vzorku [kg], c_s je měrná tepelná kapacita zkušební vzorku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], τ je časová jednotka [s], Q_i je ztrátové tepelné toky [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$], n je počet ztrátových tepelných toků [-], t_i je teplota zkušební vzorku [$^{\circ}\text{C}$] a t_e je teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$], [7].

2.5. Měření mikro kalorimetrem TAM Air

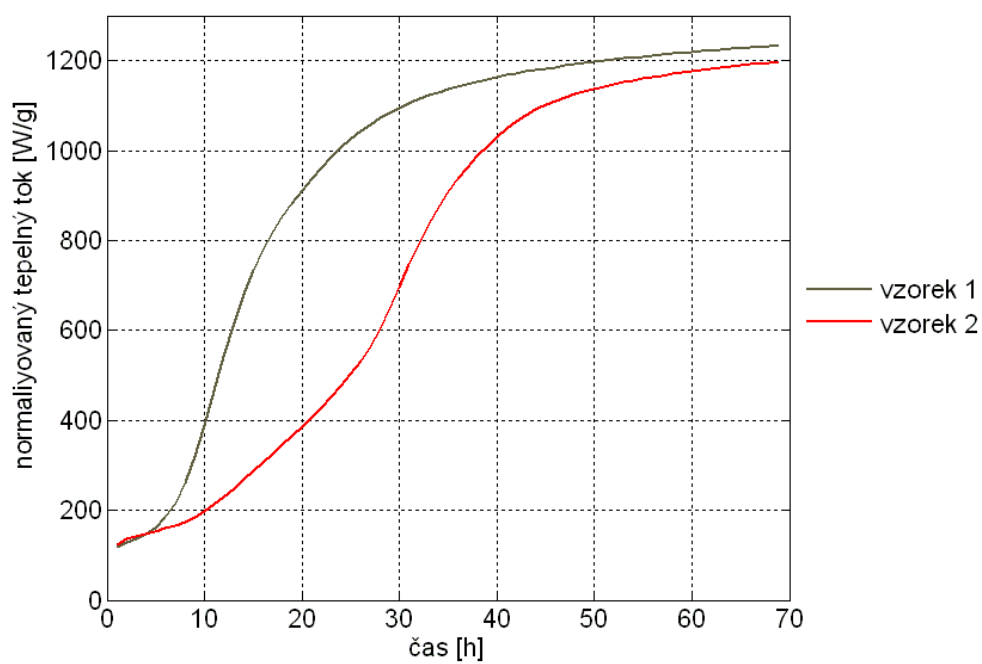
TAM Air je izotermický mikro kalorimetr TA Instruments navržený pro přesné a stabilní měření tepelných toků. Měření na kalorimetru TAM Air bylo prováděno v Laboratoři tepelných vlastností, reologie a koroze stavebních materiálů. V laboratorním měření byly porovnávány dva vzorky. Teplota lázně kalorimetru byla nastavena na 25°C . Vzorek 1 byl složen z cementu a vody. Vzorek 2 z cementu, vody a plastifikátoru Glenium 110. Složení vzorků je v tab. 3. Poměr vody a plastifikátoru vzorku 2 byl 37,5 : 1. Tento poměr odpovídá 2,5% plastifikátoru na hmotnost vody nebo cca 1% na hmotnost cementu.

Tab. 3: Obsah vzorků.

	vzorek 1	vzorek 2
cement 52.5R Hranice	5g	5g
voda demineralizovaná	1,5g	-
voda plastifikátor	-	1,5g
hmotnost celkem	6,5g	6,5g
teplota lázně kalorimetru	25 $^{\circ}\text{C}$	



Obr. 1: Závislost vývinu normalizovaného tepelného toku v čase.



Obr. 2: Závislost vývinu tepla v čase.

Z obr. 1 a obr. 2 je patrný jasný vliv plastifikátoru na vývin normalizovaného tepelného toku a vyvinu tepla. Plastifikátor výrazně zpomaluje náběh vývinu tepla.

3. Přehled a základní principy vláknově-optických senzorů

Senzor nebo sensorický systém se skládá z bloků. Těmito bloky jsou: snímač, komunikační kanál pro přenos měřené informace systému generující nebo detekující měřený signál. Systém zpracovávající a upravující signál tak, aby se dala měřená veličina vyhodnotit. Tyto jednotlivé části mohou být integrovány jako jeden celek.

Pokud je v jakékoliv části systému použito světelné záření, lze tento systém nazývat optickým respektive – fotonickým senzorem. Optický fotonický senzor je systém, ve kterém námi snímaná veličina ovlivňuje vstupní signál V_i . Po změně tohoto signálu je signál vyhodnocen většinou v elektrické oblasti a zobrazen na výstupu V_o . Měřená veličina ovlivňuje v přenášeném nebo odraženém světle, moduluje amplitudu, posun fáze, frekvenční nebo polarizační charakteristiku [3].

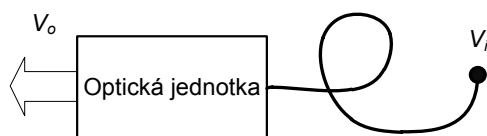
Optické senzory lze rozdělit do více skupin podle toho, z jakého úhlu pohledu je rozdělujeme.

3.1. Rozdělení podle typu měřené veličiny

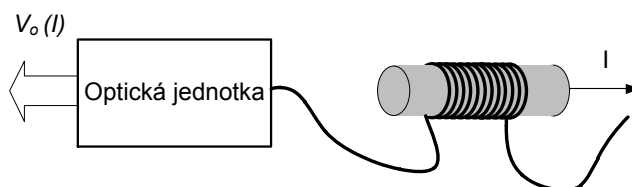
- Mechanické: optické senzory v této skupině jsou schopny měřit vibrace, posun, rychlost, zrychlení, sílu a tlak. Nejčastěji se měřením změn vyhodnocují seismické otřesy paprsky či membránami.
- Teplotní: je měřená v závislosti emisního spektra, které se projeví změnou absorpce, indexu lomu, přenosových parametrů a nelineárních jevů ve vlákne.
- Elektromagnetické: elektrické pole, proud a magnetické pole mohou být s přispěním elektro-optických, magneto-optických a Faradayových jevů transformovány, vyhodnoceny a změněny ve fotocitlivých materiálech a zařízeních.
- Radiační: k vyhodnocení rentgenového záření se využívají jevy fluorescence a luminiscence, které toto záření způsobují ve fotocitlivých materiálech.
- Chemické složení: se vyhodnocuje detekcí změny ve světelném záření a to v závislosti na změně chemického složení a koncentrace.
- Tok a vířivosti kapalin: při této metodě se využívá disperze a absorpce vyprovokovaná na značkovacích částicích.
- Biomedicínské veličiny: kyselost, okysličenost, obsah oxidu uhličitého, krevní tok, nitrolebeční tlak, teplota, identifikace DNA, sledování mozku, měření pomocí absorpce a luminiscence [3].

3.2. Rozdělení senzoru podle orientace v prostoru

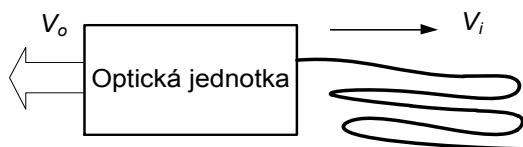
- Bodový senzor: měření veličiny dochází v jasně vymezeném bodě – prostoru. Valná většina senzorů je právě tohoto typu. Například pro měření teploty, zrychlení, tlaku a chemických parametrů obr. 3 [1].
- Integrovaný senzor: zde je měřená veličina integrovaná ze všech měřených proměnných hodnot, které ve výsledku tvoří jedinou výslednou hodnotu. Jako příklad lze uvést vláknově optický senzor pro měření elektrického proudu s využitím Faradayova jevu obr. 4 [6].
- Distribuovaný senzor: tento senzorický systém je navržen tak, aby byl schopen snímat měřenou veličinu po celé své délce. Tento typ senzoru se nejčastěji používá pro monitorování teploty a to za využití nelineárních jevů v optickém vlákne Ramanova a Brillouinova rozptylu obr. 5 [1, 8].
- Kvazi distribuovaný senzor: tento typ senzoru leží někde mezi bodovým a distribuovaným senzorem. Měřená veličina je získávána jen z předem daných bodů. V tomto případě se používají vlákna citlivá na určitou chemickou látku, nebo jsou do vláken přidávány příměsi do optické smyčky tak, aby bylo možné snímat měřenou veličinu obr. 6 [1, 9].



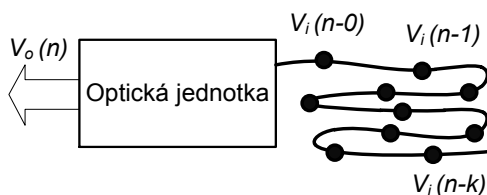
Obr. 3: Bodový senzor.



Obr. 4: Integrovaný senzor.



Obr. 5: Distribuovaný senzor.



Obr. 6: Kvazi-distribuovaný senzor.

4. Lineární a nelineární rozptyl

Optovláknové distribuované systémy jsou systémy využívající optického vlákna jako senzoru. Využívají rozptylu světla ke snímání měřené veličiny. V našem případě k měření teploty.

Rozptyl v optickém vlákne dělíme na lineární a nelineární. Lineární rozptyl má za následek lineární přechod optického výkonu, který je obsažen v jednom vidu do vidu nového. Nový vid je videm radiačním nebo vytékajícím podle toho, jestli se optický výkon zvýšil nebo snížil. Při lineárním rozptylu (elastický) mají rozptýlená optická vlna stejnou vlnovou délku λ . Výstupní výkon je přímo úměrný výkonu vstupnímu. Existují dva druhy lineárního rozptylu:

- Rayleighův rozptyl,
- Mieho rozptyl.

Nelineární rozptyl je interakcí procházejícího světla s molekulami materiálu vlákna. Výstupní výkon není přímo úměrný vstupnímu výkonu. Nelineární rozptyl je nelineární útlum, který vzniká při použití vyšších hustot optického výkonu v optických vláknech. Tento rozptyl je způsoben přenosem optického výkonu mezi vidy, kdy optický výkon přejde z jednoho vidu na jiný, který dále pokračuje ve stejném, nebo opačném směru, s jinou vlnovou délkou (frekvencí). Při nelineárním rozptylu (neelastický) mají rozptýlená optická vlna rozdílnou vlnovou délku λ . Tento typ rozptylu závisí na použité hustotě optického výkonu v optickém vlákne. Vzniká pouze nad určitou hodnotu použitého optického výkonu. Jsou dva druhy nelineárního rozptylu:

- Ramanův rozptyl,
- Brillouinův rozptyl [4].

4.1. Rayleighův rozptyl

Tento rozptyl se projevuje jako útlum vlákna, který je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky ($1/\lambda^4$).

Tento rozptyl popsal J. W. Rayleigh v roce 1899. Dokázal, že intenzita světla jako funkce souřadnice r a úhlu θ , je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky λ^4 . Tento výsledek je známý jako Rayleighova rovnice:

$$i_0 = I_0 \frac{\pi^2 \alpha^2}{\varepsilon_0^2 \lambda^4} \frac{F(\theta)}{r^2}, \quad (6)$$

kde i_0 je intenzita světla rozptýleného jednou částicí pod úhlem θ , I_0 je celková intenzita dopadajícího (primárního) záření, ε_0 je permitivita vakua ($8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2\text{J}^{-1}\text{m}^{-1}$), α je polarizovatelnost částice, λ vlnová délka primárního záření v daném disperzním prostředí, θ úhel pozorování, tj. úhel sevřený primárním paprskem a paprskem rozptýleného světla, $F(\theta)$ je funkcí úhlu pozorování, jejíž tvar závisí na charakteru primárního paprsku (polarizace).

Tento jev je důsledkem malých náhodných nehomogenit atomové struktury vlákna vztažené k velikosti vlnové délky světla procházející optickým vláknem. Tyto nehomogenity se projevují jako změny hustoty materiálu. Tato změna hustoty materiálu vlákna způsobuje změnu indexu lomu n . Nehomogenity, nedokonalosti a nečistoty vznikají již při výrobě a při tunutí optického vlákna z SiO_2 a tyto vady nelze odstranit.

Nově vzniklé sekundární zdroje záření v místech změn září do všech směrů se stejnou pravděpodobností. V samotném vlákně se projeví jen ve směrech, pro které je splněna mezní podmínka šíření. Příspěvek Rayleighova rozptylu k celkovému útlumu optického vlákna délky L je:

$$\alpha_R = \exp^{-\gamma_R L}, \quad (7)$$

α_R je přídavný útlum díky Rayleighova rozptylu, L je délka vlákna, γ_R je měrná hodnota Rayleighova rozptylu. Koeficient Rayleighova rozptylu určíme:

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_C K T_F, \quad (8)$$

kde λ je vlnová délka, n je index lomu materiálu, p je střední hodnota foto elastického koeficientu, β_C je koeficient izotermické stlačitelnosti při fiktivní teplotě T_F a K je Boltzmannova konstanta. Křemenné sklo má typickou hodnotu fiktivní teploty 1400 K. Isotermický koeficient $7 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{N}^{-1}$, index lomu 1,46 a foto elastický koeficient 0,286 [10].

4.2. Mieho rozptyl

Mieho rozptyl je způsoben nehomogenitami, které jsou rozměrově srovnatelné s velikostí vlnové délky. Je způsoben nedokonalostí válcové struktury optického vlákna. Tato nedokonalost vyplývá s nepravidelnosti vnitřního pnutí. Příčinou jsou také například bublinky ve struktuře vlákna. Mieho rozptyl se významně zvyšuje, pokud geometrické nepravidelnosti překročí 1/10 vlnové délky světla. Mieho rozptyl lze minimalizovat zdokonalením výrobního procesu, odstraněním nerovnoměrností, pečlivým tažením vlákna a nanášením dalších vrstev.[4]

4.3. Ramanův rozptyl

Ramanův rozptyl lze popsat dvěma způsoby. A to pomocí kvantově mechanického modelu jako o Brillouinova rozptylu a druhým způsobem jej lze popsat jako indukci dipólového momentu v molekule působením oscilujícího elektrického pole excitačního záření. Indukovaný dipól μ_i je zdrojem rozptýleného záření a to je přímo úměrné intenzitě elektrického pole E :

$$\mu_i = \alpha \cdot E \quad (9)$$

Koeficient úměrnosti α nazýváme koeficientem elektrické polarizovatelnosti. Určuje do jaké míry lze v molekule změnit rozložení elektrických nábojů. Koeficient vypovídá o účinnosti, se kterou je schopno působící střídavé elektrické pole indukovat v molekule dipólový moment. Vektor μ_i míří jiným směrem než vektor E , a proto nemůže být elektrická polarizovatelnost skalární veličinou, ale je tenzorem reprezentovaným maticí[5]:

$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_{zz} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Pohyby atomů při normálních vibračních módech způsobují změny tenzoru polarizovatelnosti v izotropních i anizotropních molekulách. Výchylka vibrací je dána vztahem:

$$r = R_0 \cos 2\pi\nu_{vib}t, \quad (11)$$

kde R_0 je amplituda rozkmitu o frekvenci ν_{vib} . Při zanedbání členů vyšších řádů Taylorova rozvoje tenzoru polarizovatelnosti a následnou úpravou dostaneme výsledný vztah dipólového momentu [11].

$$\begin{aligned} \mu_i = & \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right)_0 R_0 E_0 \cos[2\pi(\nu_0 - \nu_{vib})t] + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right)_0 R_0 E_0 \cos[2\pi(\nu_0 + \nu_{vib})t] \end{aligned} \quad (12)$$

Ve výsledné rovnici (12) jsou patrné tři členy s rozdílnou hodnotou frekvence rozptýleného záření. Pro pochopení fyzikálního principu činnosti Raman DTS je důležitý druhý a třetí člen rovnice. Tyto členy odpovídají Stokesově respektive anti-Stokesově části Ramanova rozptylu. Stokesovu část Ramanova rozptylu charakterizuje nižší frekvence než frekvence excitačního

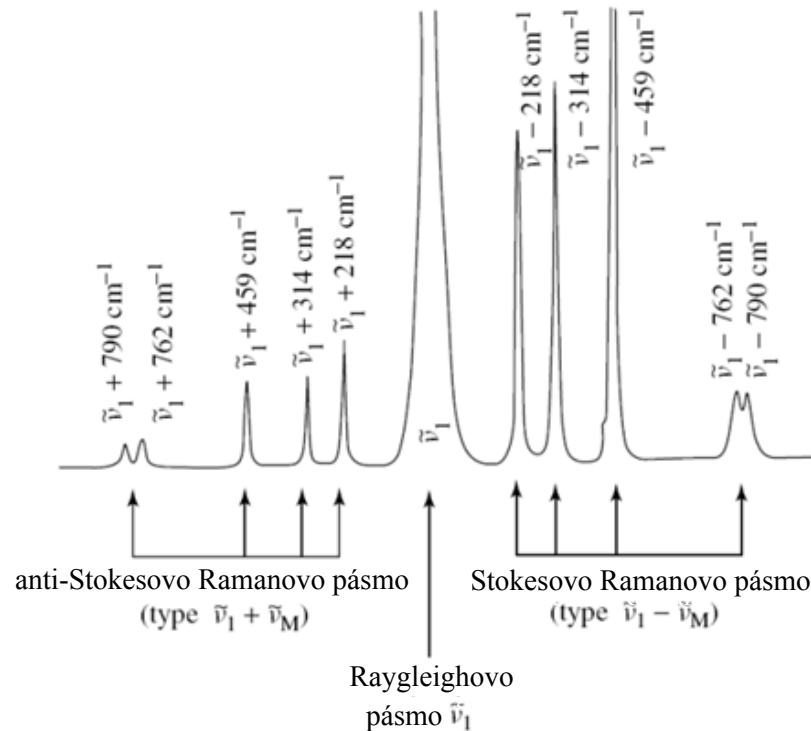
záření, oproti tomu je anti-Stokesova část charakterizována frekvencí vyšší obr. 7. Z výsledného vztahu je (12) je zřejmé:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial r} \ll \alpha_0.$$

Proto je intenzita Ramanova rozptylu mnohem menší než intenzita Rayleighova rozptylu. Pro vznik anti-Stokesovy části Ramanova rozptylu je nutné, aby se molekula již na počátku celého procesu nacházela v některém z vyšších vibračních energetických stavů v rámci základního elektronického stavu. Vzhledem k tomu, že populace těchto vyšších vibračních stavů se řídí Boltzmanovým rozdělením, je procento molekul nacházejících se v takovém stavu malé [5]. Tomu také odpovídají mnohem nižší intenzity anti-Stokesových linií ve srovnání se Stokesovými liniemi:

$$\frac{N_1}{N_0} = e^{-\frac{h\nu_{vib}}{kT}} \quad (13)$$

kde N_0 , N_1 jsou populace molekul v základním, respektive vyšším vibračním energetickém stavu, h je Planckova konstanta, ν_{vib} je vibrační frekvence molekuly, k je Boltzmanova konstanta a T je teplota.



Obr. 7: Ramanovo spektrum rozptýleného záření [5].

Ramanův rozptyl vzniká při překročení prahové hodnoty navázaného optického výkonu. Tuto hodnotu můžeme určit pomocí rovnice:

$$P_R = 5,9 \cdot 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB} \text{ [W]}, \quad (14)$$

kde d je průměr jádra vlákna, α_{dB} je útlum vlákna v dB.km⁻¹ a $\delta\lambda$ je šířka zdroje světla GHz. Typická hodnota P_R je 1,3 W.

4.4. Brillouinův rozptyl

Elektromagnetická vlna (světlo) může interagovat v látce s jinými typy vln. Například s vlnou akustickou. Při pružné deformaci prostředí dochází ke změně indexu lomu n tohoto prostředí. Proto deformace prostředí v prostoru a čase způsobená akustickou vlnou pozmění šíření elektromagnetických vln. Rozptyl světelné vlny na akustické vlně nazýváme Brillouinův rozptyl. V optických vláknech mají vliv na vznik akustických vln tepelné vibrace molekul. Na interakci světla s fonony se podílejí akustické fonony.

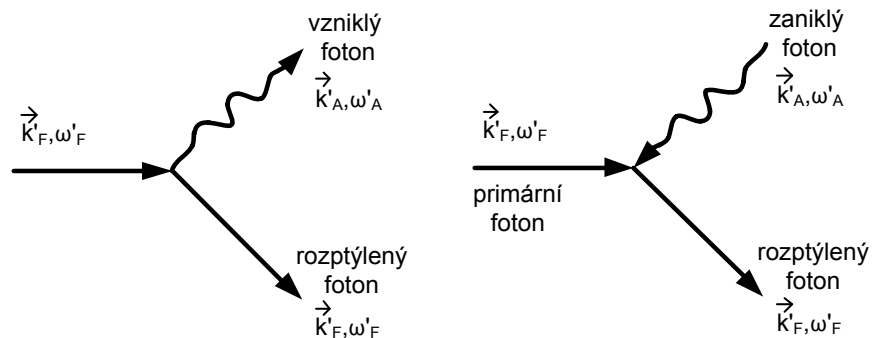
Brillouinův rozptyl vyjádříme pomocí kvantově-mechanické interakce akustické a optické vlny. Šířící se světlo optickým vláknem si lze představit jako soubor fotonů, tj. částic s energií jednoho fotonu:

$$E_F = \hbar \omega_F, \quad (15)$$

kde ω_F je uhlová rychlost světelné vlny a \hbar je redukovaná Planckova konstanta. Akustickou vlnu si lze představit jako soubor fononů, tj. částic s energií jednoho fononu:

$$E_A = \hbar \omega_A. \quad (16)$$

Při pohledu kvantové mechaniky se na interakci světelné vlny díváme jako na jev, kdy foton dává vznik novému fotonu a rozptýlení jednomu fotonu, nebo zaniknutí fotonu a rozptýlení fotonu. Toto je znázorněno na obr. 8 [12].



Obr. 8: Vznik a zánik fotonu.

Při vzniku a zániku fononu musí být dodržen zákon o zachování energie. Suma energie fotonů a energie fononů před interakcí se rovná energii vzniklé částice (rozptýlenému fotonu) po interakci. Rovnice vyjádření:

$$\hbar\omega_F \pm \hbar\omega_A = \hbar\omega'_F. \quad (17)$$

Matematické znamínko ve vztahu č. (17) reprezentuje situaci vzniku (zániku) fotonu. Frekvence akustické vlny bude daná:

$$\omega_A = 2\omega_F n(\omega_F) \frac{v_F}{c} \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right). \quad (18)$$

K největší změně frekvence (vlnové délky) dojde, když se rozptýlená vlna šíří zpět, tj. kdy $\Theta = \pi$, můžeme určit frekvenci (vlnovou délku) rozptýlené vlny:

$$\omega'_F = \omega_F \pm \omega_A. \quad (19)$$

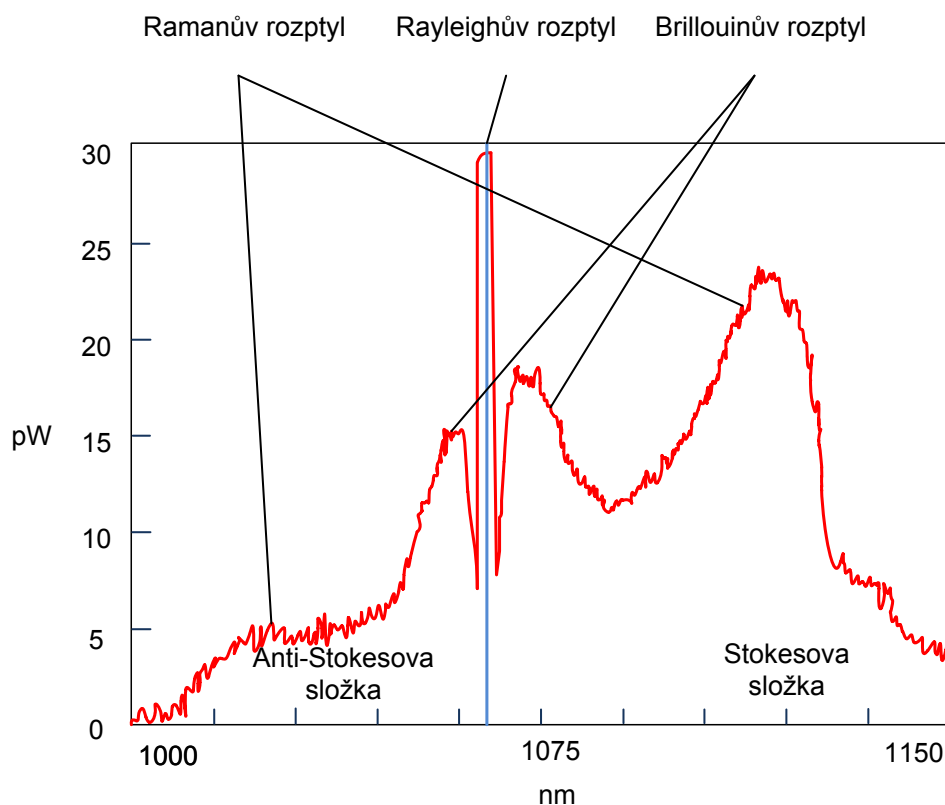
Dle vztahu č. (19) je zřejmé, že se v takto rozptýleném světle mohou objevit frekvence $(\omega_F + \omega_A)$, kterým říkáme anti-Stokesovy složky a frekvence $(\omega_F - \omega_A)$, kterým říkáme Stokesovy složky Brillouinova spektra. To platí i pro vyšší řady $(\omega_F \pm n\omega_A)$. Tyto frekvence se nacházejí po obou stranách základní frekvence primárního (excitačního) záření ω_F [4].

Prahovou hodnotu navázaného optického výkonu do jedno vidového vlákna při které vzniká Brillouinův rozptyl, můžeme vyjádřit pomocí rovnice:

$$P_B = 4,4 \cdot 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB} \delta\lambda \quad [\text{W}], \quad (20)$$

kde d je průměr jádra vlákna, α_{dB} je útlum v dB.km^{-1} a $\delta\lambda$ je šířka zdroje světla GHz. Typická hodnota P_B je 80 mW.

Rozptýlené světlo přijímané zpět z optického vlákna se Stokesovou a anti-Stokesovou složkou je na obr. 9.



Obr. 9: Rozptýlené světlo v optickém vlákně.

Rozptýlené světlo přijímané zpět z optického vlákna proto obsahuje tři různá spektra patrná na obr. 9:

- Rayleighův rozptyl s vlnovou délkou použitého laseru,
- Stokesova část spektra vykazuje teplotní nezávislost,
- anti-Stokesova část spektra mění velikost intenzity na základě změny teploty.

5. Optovláknové distribuované systémy

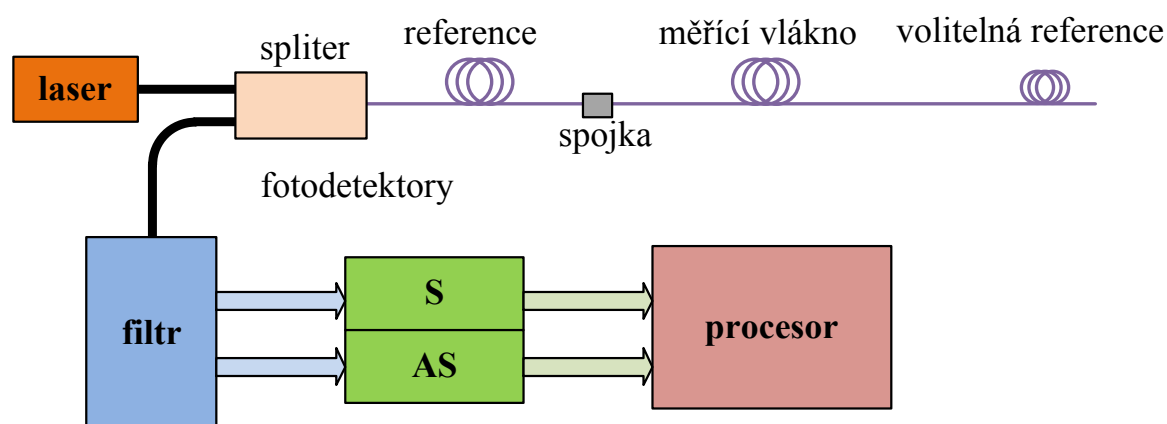
Měřicí přístroje postavené na technologii DTS (*Distribution Temperature System*) jsou systémy, založené na podobném principu jako OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*). Využívají optické vlákno jako senzor. Díky unikátním vlastnostem optického vlákna se čím dál častěji používají v průmyslovém prostředí. Dnes se využívají v těchto oblastech průmyslu:

- monitoring úniků na produktovodech,
- monitoring průsaků u vodních staveb,
- měření teplotních profilů vrtů pro tepelná čerpadla
- detekce požáru.

Do vlákna je vyslán laserem světelný puls po dobu-šířku 10ns. Jistá část tohoto světelného pulsu se odráží od materiálu, kterým je tvořeno samotné optické vlákno a vrací se zpět optickým vláknem k vyhodnocení měřicím přístrojem obr. 9.

Při odrazu dochází ke změně vyslaného impulsu. Proto se systémy DTS dělí podle využitého jevu. Pokud se vrací vyslaný impuls se stejnou vlnovou délkou, jde o elastický Rayleighův rozptyl. Při změně vlnové délky se jedná o neelastický Brillouinův, Ramanův rozptyl [4].

U systému detekující Ramanův simulovaný rozptyl se využívají více vidová optická vlákna. U těchto vláken je průměr jádra vlákna 50 μm a průměr pláště je 125 μm . Využívají se vlákna s co největší numerickou aperturou pro zvýšení vedení zpětně odraženého světla. Nevýhodou použití mnoho vidových vláken je vyšší útlum a tím menší dosah takového systému. Běžný dosah takového systému je jen 8 až 10 km. Měřitelné rozlišení je 1 m. Toto představuje v reálu 8000 až 10000 senzorických bodů na jedné optické trase. Teplotní rozlišení systému je 0,01 $^{\circ}\text{C}$ [14].



Obr. 10: Blokové zapojení Raman DTS.

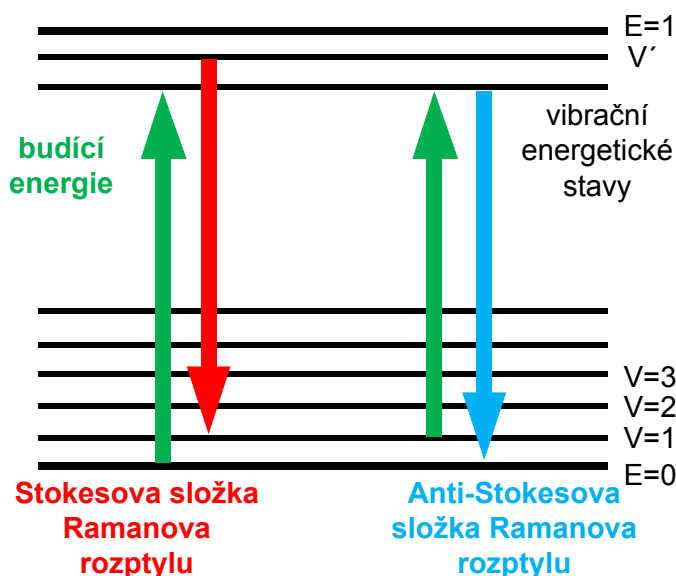
Ramanův rozptyl na rozdíl od Brillouinova rozptylu není citlivý na mechanické napětí, proto zpětně rozptýlené světlo uvnitř optického vlákna nese pouze informaci o teplotě podél optického

vlákna, respektive o teplotě, kde nastal Ramanův rozptyl. Pro přesné určení teploty na tomto systému musí být rozptýlené světlo vztaženo k teplotně nezávislému jevu na tomto optickém vlákně, musí dojít ke kalibraci proti referenci.

5.1. Princip činnosti Raman DTS

Optická vlákna jsou vyrobena z křemenného skla. Křemenné sklo je forma oxidu křemičitého (SiO_2) s amorfni pevnou strukturou. Teplo vyvolává oscilace v krystalické mřížce. Když světlo dopadá na tyto teplem rozkmitané molekuly, dochází k interakci mezi světelnými částicemi (fotony) a elektrony v molekule. Dochází zde k Ramanovu rozptylu. Od dopadajícího světla se toto světlo liší o spektrální posun o částku rovnající se rezonanční frekvenci kmitů mřížce.

Když dojde ke srážce molekuly s fotony excitujícího záření, dochází zde k výměně energie mezi fotonem a molekulou. Ty způsobí změnu energetické hladiny fotonu. Toto lze popsat kvantově mechanický modelem, který zahrnuje vlnově-částicovou povahu kvant záření, fotonů a kvantování energetických hladin molekuly obr. 11, nebo pomocí indukce dipólového momentu v molekule působením oscilujícího elektrického pole excitačního záření [11].



Obr. 11: Energetické stavy fotonů [13].

Pokud chceme zjistit teplotu v určité oblasti optického vlákna z (vzdálenost od čela optického vlákna), je nutné se nejprve zaměřit na spektrum Ramanova rozptylu. Složka I_S je intenzita Stokesovy části Ramanova rozptylu, I_{AS} je intenzita anti-Stokesovy části Ramanova rozptylu. Vztahy vyjadřující intenzitu vracejících se složek částí Ramanova rozptylu jsou popsány vztahy (20) a (21). Pro oba vztahy platí stejný vztah pro útlum od začátku vlákna do vzdálenosti od bodu ve vlákně z . Používané lasery v optovláknových DTS na bázi Ramanova stimulovaného

rozptylu mají vlnovou délku 1064 nm. Vrcholy částí Ramanova spektra jsou posunuty ± 40 nm, na 1104 nm a 1024 nm. Vzhledem k tomu, že útlum je funkcí vlnové délky, může tento jev způsobit chybu v určení teploty, tomuto se zamezí správnou kalibrací před samotným měřením, [17].

$$I_S(z) = C_S e^{-\alpha_R z} e^{-\alpha_S z} \langle n_k \rangle, \quad (21)$$

$$I_{AS}(z) = C_{AS} e^{-\alpha_R z} e^{-\alpha_{AS} z} (\langle n_k \rangle + 1), \quad (22)$$

kde C_S a C_{AS} jsou konstanty a

$$\langle n_k \rangle = \frac{e^{-\frac{\hbar\Omega}{kT(z)}}}{1 - e^{-\frac{\hbar\Omega}{kT(z)}}}, \quad (23)$$

kde \hbar je redukovaná Planckova konstanta, k je Boltzmanova konstanta, $2\pi\Omega$ je červený a modrý posuv ve frekvenci. Platí přibližný vztah:

$$\frac{\hbar\Omega}{k} \cong 600^\circ K. \quad (24)$$

Pro optovláknové distribuované systémy, které využívají Ramanova stimulovaného rozptylu v optickém vlákne, je nejvíce důležitá anti-Stokesova část spektra. Tato část spektra mění velikost intenzity na základě změny teploty podél profilu optického vlákna. Stokesova část spektra je teplotně nezávislá složka. DTS proto principiálně pracují na základě poměru intenzity anti-Stokesovy části spektra vůči Stokesovy části [17]:

$$\frac{I_S(z)}{I_{AS}(z)} = \frac{C_S}{C_{AS}} e^{-\Delta\alpha z} e^{-\frac{\hbar\Omega}{kT(z)}}, \quad (25)$$

kde $\Delta\alpha = \alpha_S - \alpha_{AS}$ a je větší než nula. Pro vlnovou délku laseru 1064 nm vykazují tyto diferenciální ztráty přibližně hodnoty 0,347 dB/km. Ze vztahu (25) pro získání úrovně teploty $T(z)$ v místě z od začátku optického vlákna, dostaneme rovnici:

$$T(z) = \frac{\frac{\hbar\Omega}{kT(z)}}{\ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right) - \Delta\alpha z - \ln\left(\frac{I_S(z)}{I_{AS}(z)}\right)}. \quad (26)$$

Rovnici (26) můžeme dále přepsat pomocí mocninné řady s aproximací:

$$\frac{1}{(1-x)} = 1 + x + x^2 + \dots, \quad (27)$$

za předpokladu, že x nabývá malých hodnot a tudíž vyšší řády x mohou být zanedbatelné:

$$T(z) \cong \frac{\frac{\hbar\Omega}{k}}{\ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right) - \ln\left(\frac{I_S(z)}{I_{AS}(z)}\right)} \cdot \left\{ 1 + \frac{\Delta\alpha z}{\ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right) - \ln\left(\frac{I_S(z)}{I_{AS}(z)}\right)} \right\}. \quad (28)$$

Úpravou rovnice (27) dostaneme finální matematický vztah popisující princip činnosti optovláknového DTS na bázi Ramanova stimulovaného rozptylu (28). Finální podoba rovnice je lineární kombinací teplotního offsetu (první část rovnice), difference útlumu v optickém vlákne (druhá část rovnice) a měřené teploty na základě poměru anti-Stokesovy a Stokesovy části Ramanova spektra (třetí část rovnice):

$$T(z) \cong T_{REF} \left(1 + \frac{\Delta\alpha z}{\ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right)} + \frac{\ln\left(\frac{I_S(z)}{I_{AS}(z)}\right)}{\ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right)} \right), \quad (29)$$

kde teplotnímu offsetu T_{REF} odpovídá vztah:

$$T_{REF} = \frac{\hbar\Omega}{k \ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right)}. \quad (30)$$

5.2. Brillouin DTS

DTS systémy detekující Brillouinův stimulovaný rozptyl používají jedno vidová vlákna. Průměr jádra je 9 μm a průměr pláště 125 μm . Tento systém je schopen měřit teplotu a mechanické napětí [24]. Dosah tohoto systému je díky použití jedno vidového vlákna mnohem vyšší než u Raman DTS a to až 50 km s rozlišením 0,5 m a teplotní rozlišitelností 0,05 $^{\circ}\text{C}$ [14].

Teplota snímaná optickým vláknem z jeho okolí může být odvozená z poměru elastického (Rayleighova) rozptylu a neelastického Brillouinova rozptylu, známého jako Landau Placzek poměr (Landau-Placzek Ratio, LPR) [15]:

$$LPR = \frac{T_F}{T} \left(\beta_T \rho v_a^2 - 1 \right), \quad (31)$$

kde T_F je fiktivní teplota, β_T je isotermická stlačitelnost, ρ je hustota materiálu a v_a je akustická rychlost. V praxi se setkáme s hodnotami $T_F = 1943$ K, $\rho = 2200$ Kg.m⁻³, $\beta_T = 7 \cdot 10^{-11}$ m²N⁻¹, $v_a = 5960$ m.s⁻¹ při LPR = 30. Teplotní citlivost Brillouinova rozptylu je 0,3% K⁻¹. Brillouinův rozptyl je citlivý i na mechanické napětí působící na optické vlákno. Byl zaveden vztah vyjadřující vzájemnou závislost mezi mechanickým napětím a teplotou. Pomocí známých tabulek odezev teplotních funkcí může být mechanické napětí získáno použitím napětí-o-mechanických odezev při známé teplotě definovaných jako:

$$R(\varepsilon)_{Td} = \frac{\zeta(\varepsilon)_{Td}}{1 - \zeta(\varepsilon)_{Td}}, \quad (32)$$

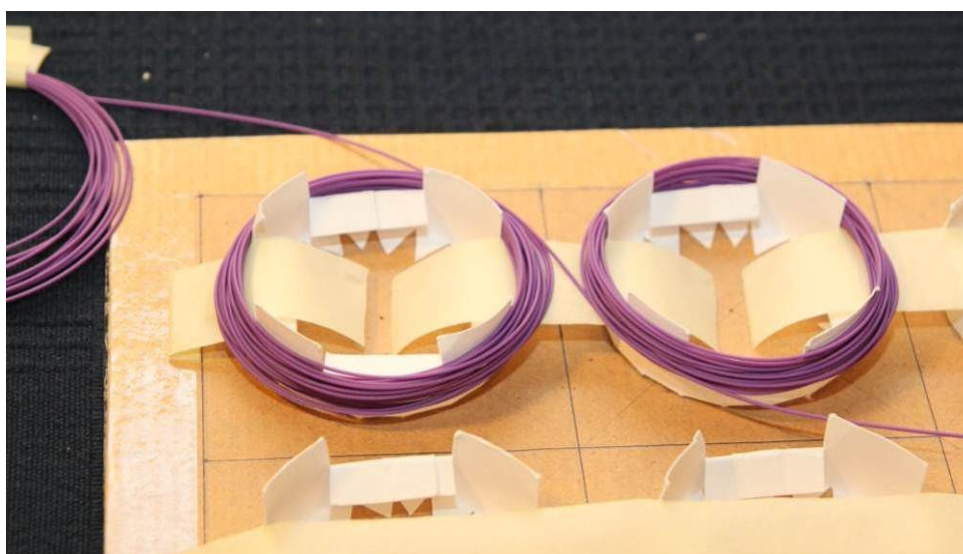
kde $\zeta(\varepsilon)_{Td}$ je Brillouinův přenos pro danou teplotu T_d kolísající pouze s mechanickým napětím ε na testovaném optickém vlákne. Intenzita Brillouinova rozptylu, snímaná pomocí DTS, odpovídá vztahu:

$$I_{BS} \propto \frac{T}{\omega^2} \left| \int q_1 e^{i(\bar{k}_p - q_1)\bar{r}} + e^{i\gamma} q_2 e^{i(\bar{k}_p - q_2)\bar{r}} d\bar{r} \right|^2, \quad (33)$$

kde T je teplota, ω je akustická úhlová rychlost, k_p je vlnový vektor rozptýleného světla, γ je relativní fáze při změně směru módu pole. Jak je známo z teorie Brillouinova rozptylu, rozdělujeme v oblasti optického spektra tento rozptyl na část anti-Stokesovu a část Stokesovu. Teplotně (napětí-o-mechanicky) závislá je pouze část anti-Stokesova.[5]

6. Využití distribuovaného senzoru v bodovém režimu

DTS systémy mají tu velkou výhodu, že měří snímanou veličinu, v našem případě teplotu, podél celé délky trasy. Bodový senzor změří námi zjišťovanou hodnotu pouze v jednom daném bodě. Ideálem by byl senzor, který by byl kombinací těchto dvou. DTS systémy se tomu blíží. Dnes je rozlišitelnost systému DTS Raman 1 m a systému DTS Brillouin 0,5 m. Omezení daná délkou, na které je teplota snímána, lze obejít již při návrhu konstrukce senzoru. Z optického vlákna lze navinout meandr a tak nesnímáme teplotu podél celé délky 1 m pro minimální rozlišitelnost, ale v mnohem menším prostoru, viz obr. 12.



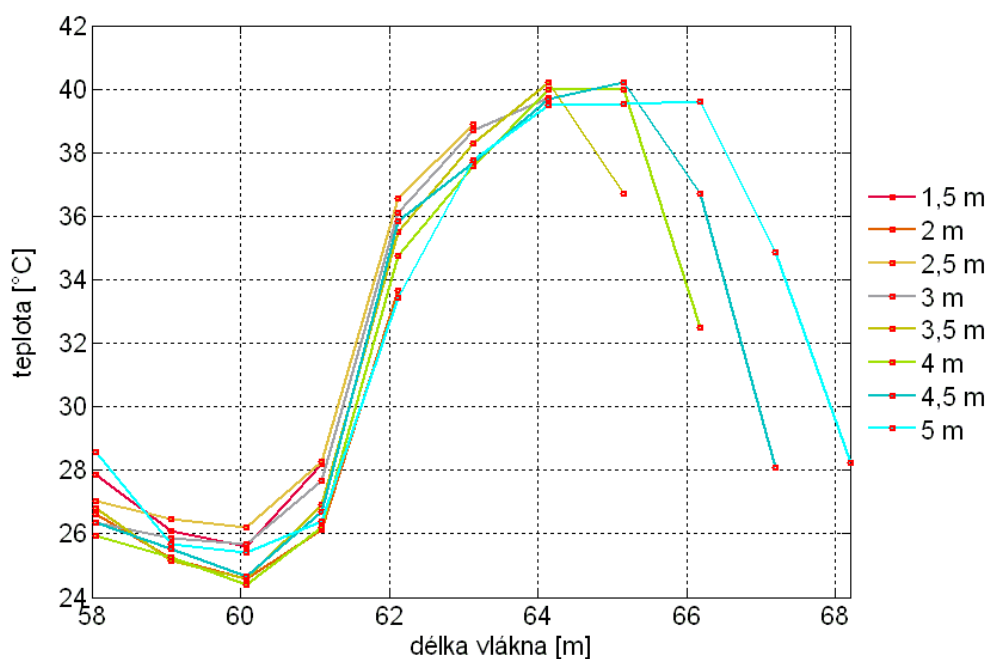
Obr. 12: Meandry z optického vlákna o průměru 6 cm.

V ideálním případě by měl mít meandr co nejmenší průměr a co největší délku namotaného optického vlákna.

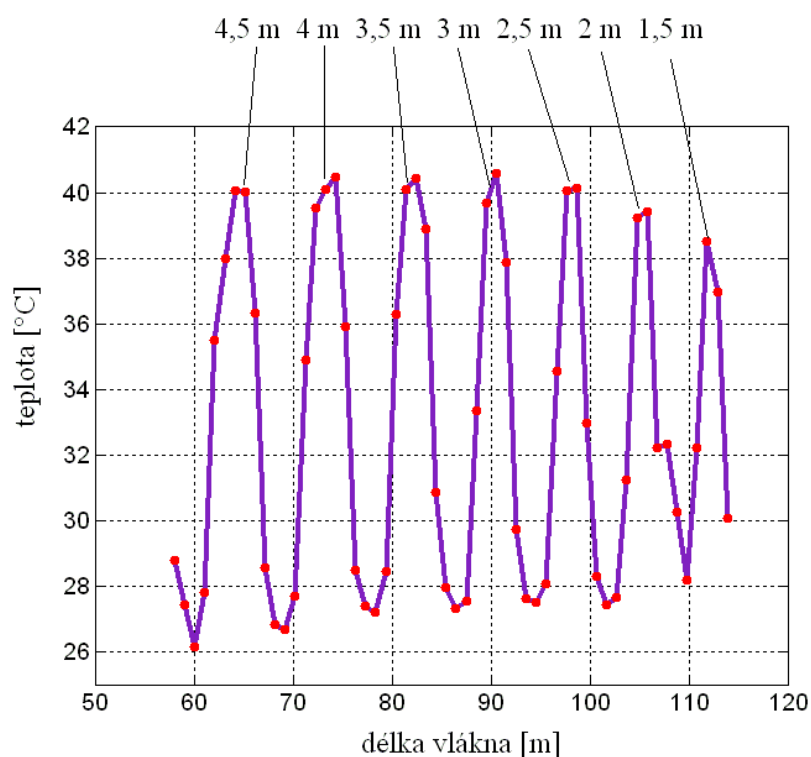
6.1. Určení minimální délky optického vlákna v senzoru

Experimentálním měřením v laboratoři bylo zjišťováno, jaká je minimální délka namotaného optického vlákna v senzoru skládajícího se z meandrických kroužků.

Pro konstrukci snímače bylo použito standardní optické vlákno používané v datových sítích. Přesněji mnoho vidové vlákno o průměru jádra 50 μm a průměru pláště 125 μm . Jedná se o standardizované optické vlákno podle ITU-T normy G. 651. Byly použity dva typy vláken a to vlákno pouze s primární ochranou o vnějším průměru 250 μm a vlákno s těsnou sekundární ochranou o vnějším průměru 900 μm [19].



Obr. 13: Závislost změřené teploty na délce vlákna v meandru.



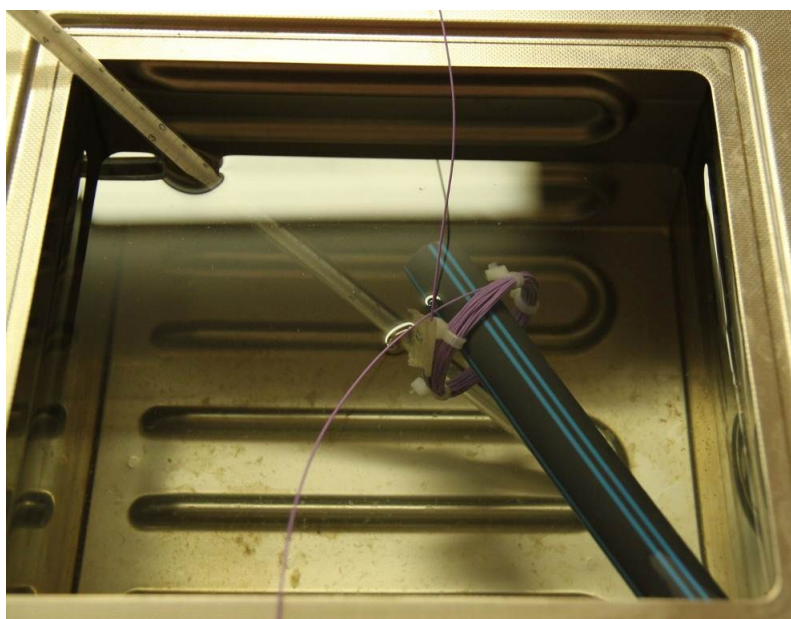
Obr. 14: Závislost změřené teploty na délce vlákna v meandru.

Byly vytvořeny senzory z meandrických kroužků, ve kterých bylo namotáno optické vlákno od délky 1,5 do 5 m. Meandrické kroužky byly pospojovány tak, že byly ponořeny ve vodní lázni Memmert, kde byla udržována teplota 40 °C. Teplota vodní lázně byla kontrolována laboratorním

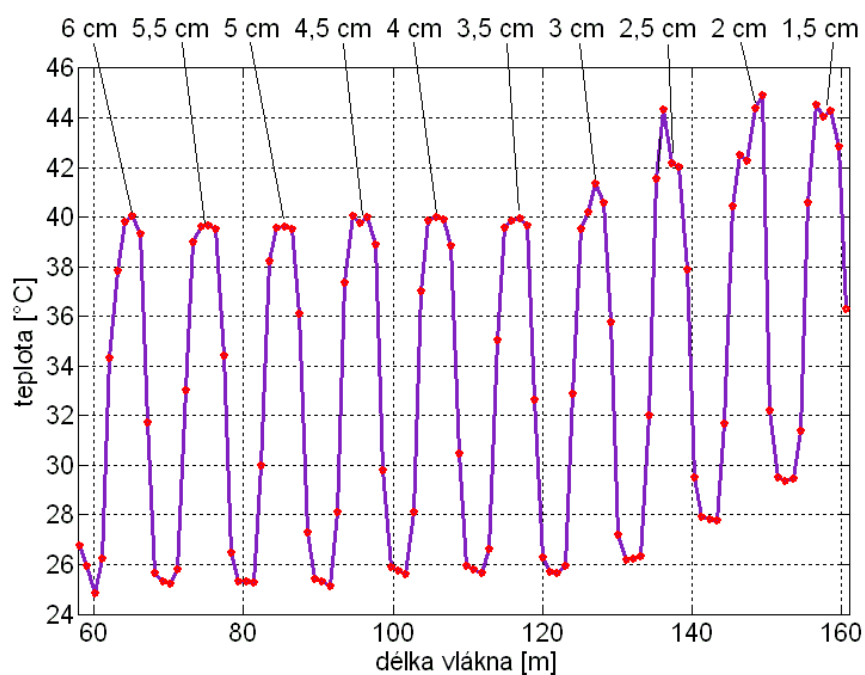
teploměrem. Vláknem mezi jednotlivými senzory (kroužky) bylo mimo měřicí nádobu při teplotě v laboratoři 25 °C. Z obr. 11 a obr. 12 je patrné, že při kratších délkách optického vlákna namotaném v senzoru je vyhodnocená měřená teplota vodní lázně ovlivněna teplotou v místnosti laboratoře. Při použití kratších délek optického vlákna je vyhodnocená teplota výrazně nižší než teplota vodní lázně. Při laboratorních měření bylo zjištěno, že minimální délka vlákna, vhodná pro použití v senzoru, je 3 m.

6.2. Určení minimálního průměru senzoru

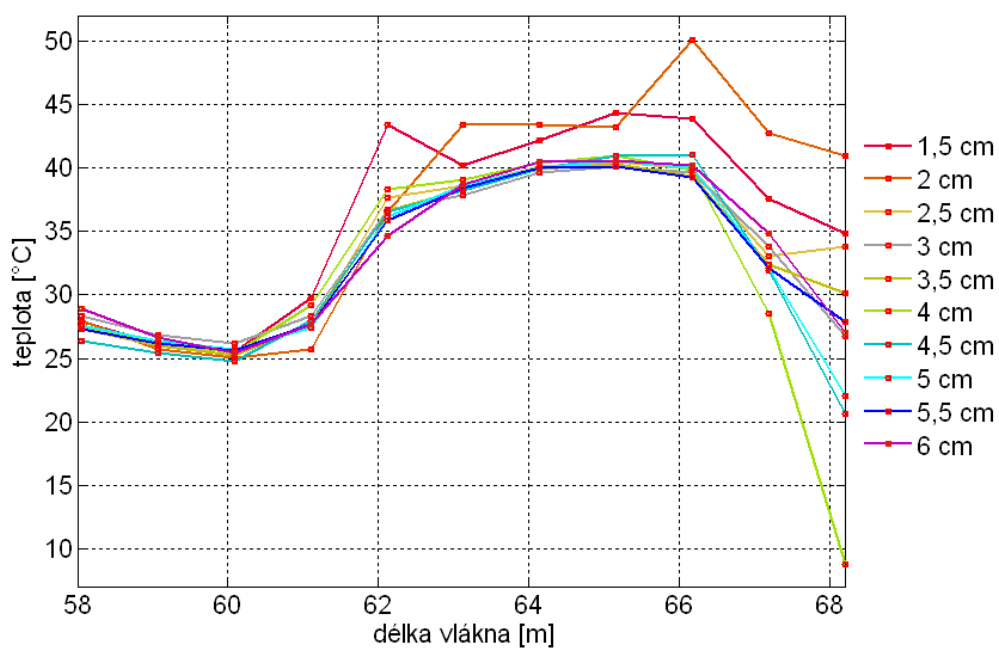
Dalším experimentálním měřením v laboratoři byl zjišťován minimální průměr kroužků v senzoru. Bylo změřeno, že minimální průměr u mnoho vidového vlákna s těsnou sekundární ochranou o vnějším průměru 900 μm je 3,5 cm. U meandrů pod tento průměr se projevují ztráty způsobené makro ohyby. Makro ohyby způsobují vyvazování toku fotonů z jádra do pláště, tímto dochází ke ztrátám výkonu – útlumu. Útlum při měření se projevuje jako zvýšení teploty na měřicím senzoru. Z obr. 16 a obr. 17 je patrné, že vyhodnocená teplota na senzorech namotaných na menším průměru než 3,5 cm je výrazně vyšší než teplota vodní lázně [16].



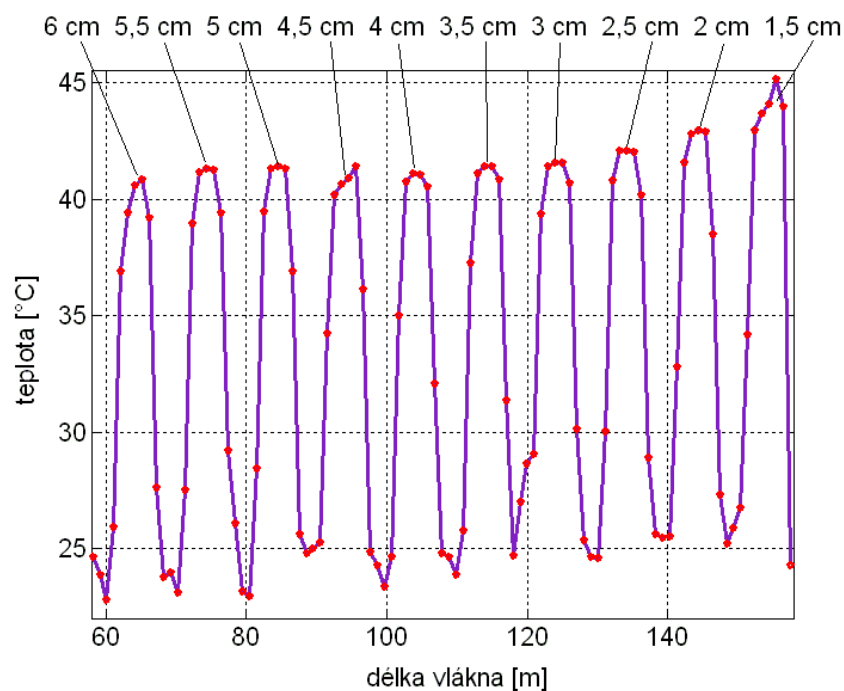
Obr. 15: Umístění prvního senzoru při měření ve vodní lázni.



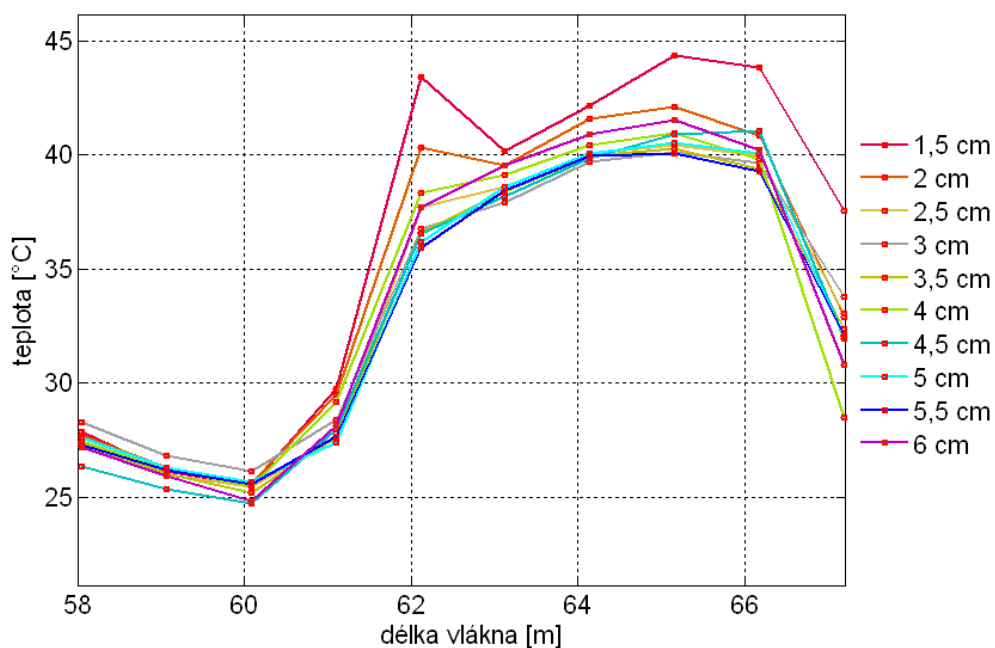
Obr. 16: Vlákno s těsnou sekundární ochranou o vnějším průměru 900 μm .



Obr. 17: Vlákno s těsnou sekundární ochranou o vnějším průměru 900 μm .



Obr. 18: Vlákno pouze s těsnou primární ochranou průměru 250 μm .



Obr. 19: Vlákno pouze s těsnou primární ochranou průměru 250 μm ..

U mnoho vidového vlákna pouze s těsnou primární ochranou o průměru 250 μm je minimální průměr meandru 3 cm. U meandrů pod tento průměr se projevují ztráty a nepřesnosti vyhodnocení teploty. Z obr. 18 a obr. 19 je patrné, že vyhodnocená teplota na senzorech namotaných na menším průměru než 3 cm je vyšší než teplota vodní lázně [16].

7. Návrh aplikace na bázi optovláknového Raman DTS

Bylo požadováno měřit teplotu hydratace betonu v prostoru a čase. Hydratace je chemická reakce, při které se směs nasycuje vodou. Hydratační reakce cementu jsou provázeny vývinem tepla.

7.1. Návrh a konstrukce senzoru

Pro měření v masě betonu bylo vybráno optické vlákno s těsnou sekundární ochranou, i když lze s vláknem jen s primární ochranou vytvořit meandry s menším průměrem. Vláknem s těsnou sekundární ochranou je mechanicky odolnější a tak je menší pravděpodobnost, že při laboratorním měření dojde k mechanickému poškození a tím k znehodnocení měření. S vláknem se sekundární volnou ochranou se také mnohem lépe pracuje. Hydratačního teplo betonu je měřeno v preformě o rozměrech $40 \times 40 \times 40$ cm.

Byla vybrána varianta meandrového pole o rozlišení 5×5 senzorů s průměrem 6 cm obr. 20. Mezi jednotlivými senzory je mezera 2 cm pro oddělení měřících bodů. Po namotání vlákna je tato mezera 1 cm.

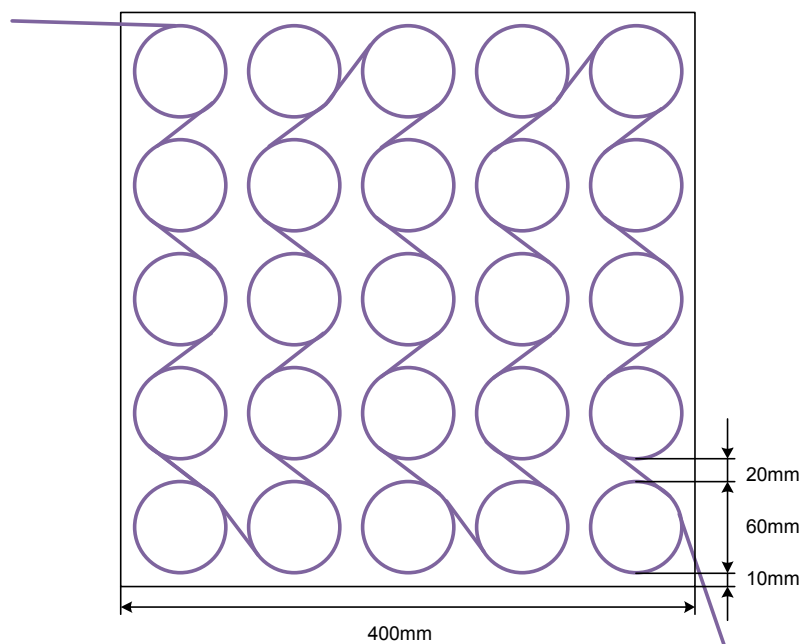
Meandrová pole byla vytvořena pro čtyři vrstvy měření. Délka vlákna v jednom meandru byla zvolena nad minimální délku vlákna pro senzor a to 4 m. Byla vypočítána celková délka pole a počet závitů v jednom senzoru.

$$o = \pi \cdot d, \quad (35)$$

$$o = \pi \cdot 0,06 = 0,1885m, \quad (36)$$

$$n_z = \frac{l_s}{o} = \frac{4}{0,1885} \approx 21 \quad (37)$$

Jedno meandrové pole obsahuje 25 senzorů, 525 závitů a to je 100m vlákna. Celkem i s vláknem mezi meandrovými poli je to 520 m optického vlákna.



Obr. 20: Rozložení senzorů v meandrovém poli.



Obr. 21: Namotávání meandrů pro pole o rozlišení 8×8 .



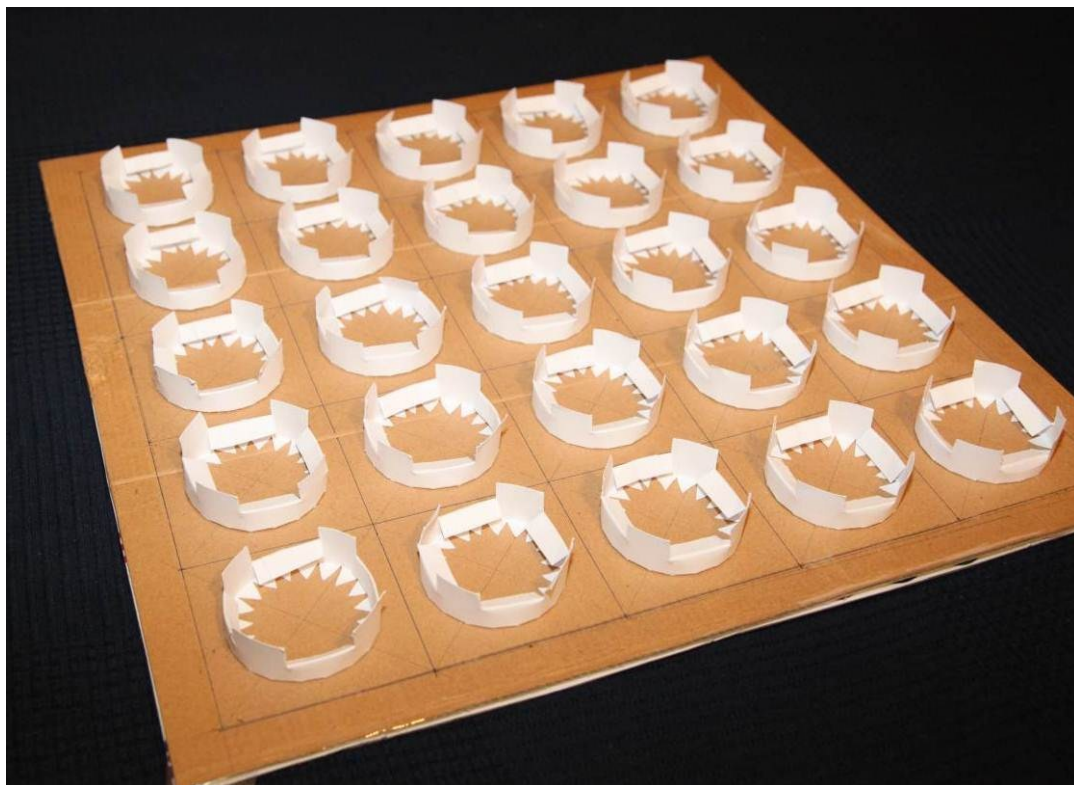
Obr. 22: Kompletní meandrové pole o rozlišení 8×8 .

7.2. Postup pro vytvoření meandrového pole

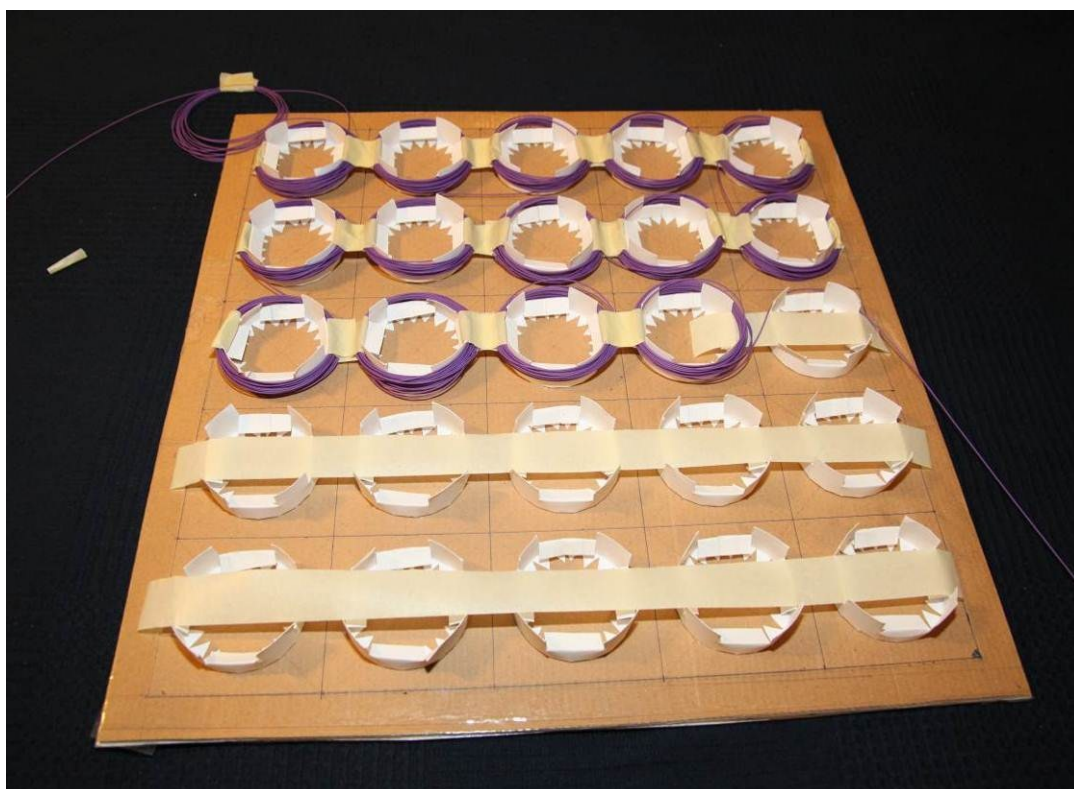
Optické vlákno jako snímací prvek je dostatečně ohebné, ale má tu nevýhodu, že se nedá tak snadno kroutit jako provázek. Tento problém musel být vyřešen při postupu výroby meandrového pole. Při konstrukci jednoho meandru s volným koncem vlákna toto problém není. Volný konec se volně kroutí a vytvoření jednoho meandru je velmi snadné.

Pro meandrové pole o rozlišení 5×5 je v jednom meandru 4 m vlákna a v celém meandrovém poli cca 100 m vcelku.

Byla vytvořena šablona, podle rozměrů obr. 20 z kartonu. Okraje byly olemeny kancelářskou lepicí páskou tak, aby mohla být na okraje přilepena malířská páska. Z papírové čtvrtky byly vytvořeny kroužky a ty byly po vyschnutí přilepeny. Po důkladném zaschnutí byly nastříhány a pozohýbány tak (obr. 23), aby se do kříže dala umístit malířská lepicí páska. Ta je přilepena na okraji a svou nelepící stranou položena na kroužcích. Strana s lepem je nahoře.



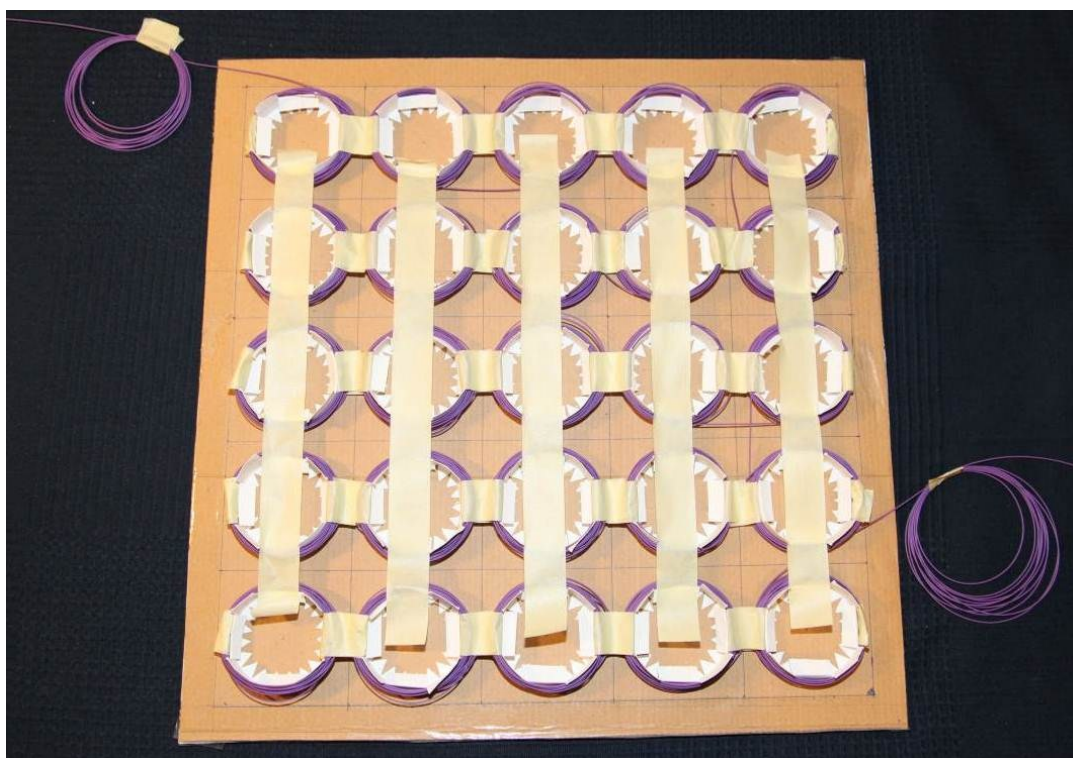
Obr. 23: Šablona pro meandrové pole.



Obr. 24: Navíjení sensorů na šablonu.

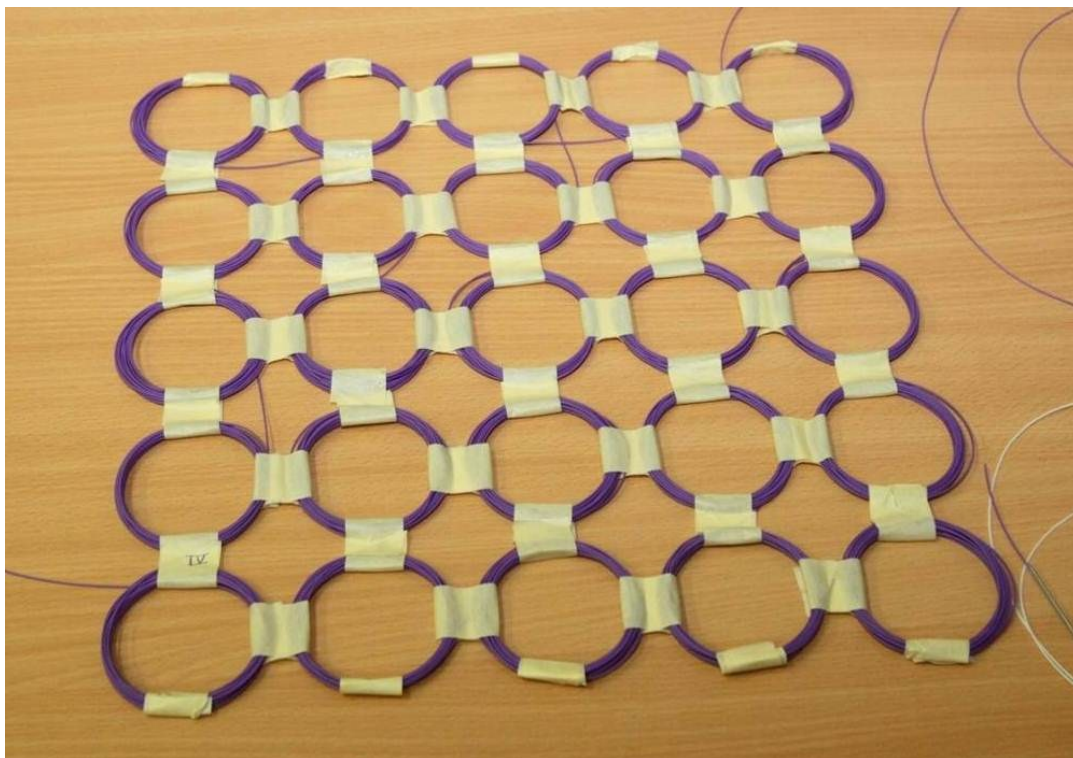
Z optického vlákna byla vytvořena rezerva na propojení meandrových polí a bylo namotáváno první pole. Protože se vlákno velmi kroučí je potřeba dodržet správný postup. První meandr je motán ve směru hodinových ručiček, druhý proti směru hodinových ručiček což zamezí kroucení vlákna, které vzniká mezi šablonou s již vytvořenými senzory a vláknem zbývajícím na bubnu. I při dodržení výše uvedeného postupu se vlákno kroučí tak, že se musí sledovat, do jaké míry je vlákno zkrouceno.

Druhou variantou je otáčení celým bubnem proti směru motání senzoru, aby docházelo k odkroucení vlákna. Tento postup je velmi nepraktický. Motáním ve směru a proti směru hodinových ručiček se ušetří spoustu času při konstrukci senzorického pole.



Obr. 25: Přelepení pole v druhé ose.

Po vytvoření senzoru z meandrů byla vždy rozstříhnutá lepicí páska a senzor byl zalepen tak, aby nedošlo k jeho uvolnění a rozmotání. Po zaplnění celé šablony bylo opět na konci ponecháno volné vlákno na propojení polí. Všechny meandry byly důkladně zalepeny. Tímto byly slepeny meandry vodorovně obr. 24. Rozpadnutí pole předejdeme tím, že ho přelepíme páskou i ve svislé ose obr. 25. Šablona byla převrácena, opatrně bylo sundáno pole z šablony, páska byla opatrně nastříhána a opět důkladně slepena. Tímto postupem byla vytvořena 4 senzorická pole. Výroba jednoho pole trvá zhruba 3 hodiny. Kompletní pole je na obr. 26.



Obr. 26: Kompletní meandrové pole.

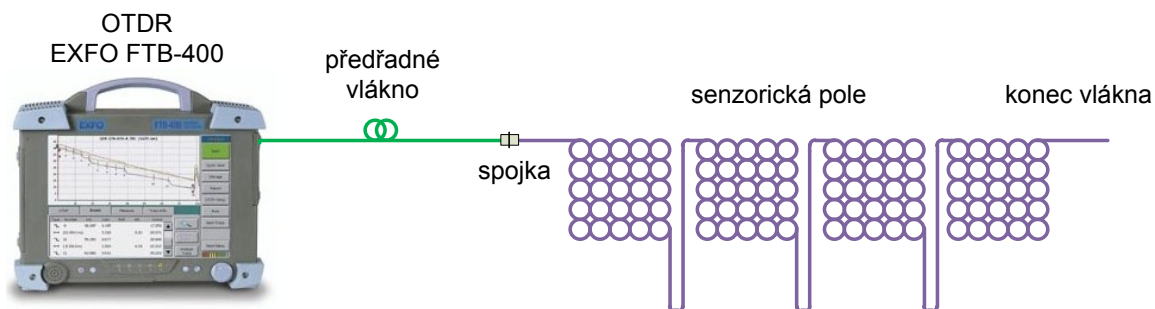
Posledním krokem je pospojování senzorických polí svářečkou dohromady do jednoho celku. Konce byly opatřeny kabely s konektorem, aby se dala pole kalibrovat a proměřit.

7.3. Měření útlumu

Pro kontrolu správného navinutí meandrů bylo provedeno měření dvěma metodami. Optická trasa byla proměřena nepřímou metodou reflektometrem a přímou metodou.

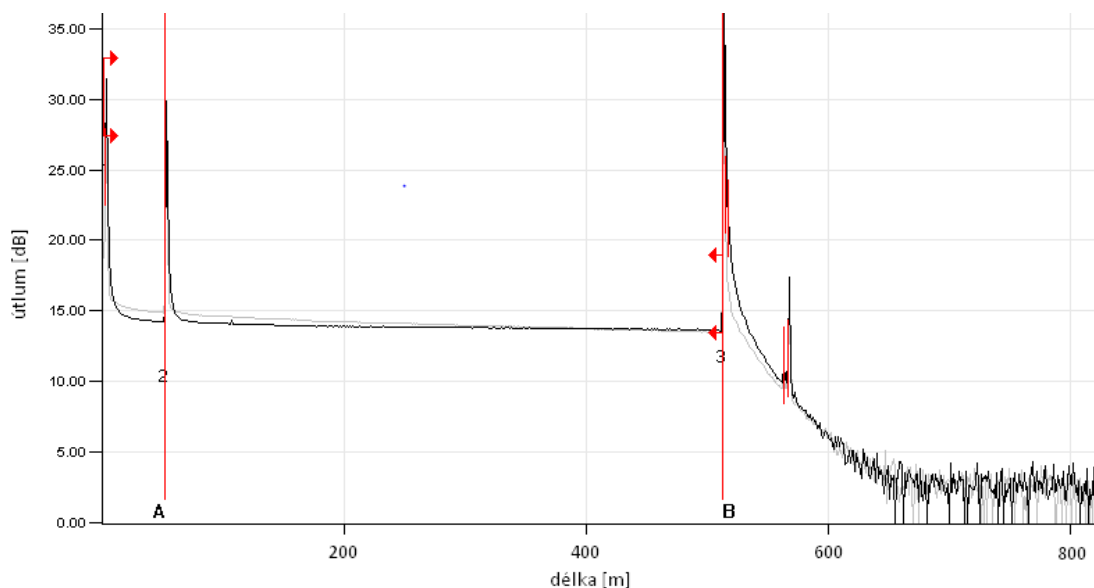
7.3.1. Měření pomocí OTDR

Měřením pomocí OTDR se ověřilo, zda je optická trasa v pořádku a zda nedošlo při tvorbě meandrových polí k poškození optického vlákna. Schéma zapojení je na obr. 27.



Obr. 27: Schéma zapojení měření útlumu trasy pomocí OTDR..

Na grafickém výstupu z OTDR obr. 28. jsou patrné dvě části trasy. První část od počátku do bodu A je předřadné vlákno, ukončené odrazem na optické spojce.



Obr. 28: Útlum trasy změřený pomocí OTDR.

Druhá část od bodu A ukončená odrazem na konci vlákna v bodě B je optické vlákno v meandrových polích. Z grafu je patrné, že při navinutí meandrů nedošlo k poškození vlákna, že je průběh lineární. Změřený útlum odpovídá počtu závitů a délce optické trasy.

Tab. 4: Změřený útlum OTDR

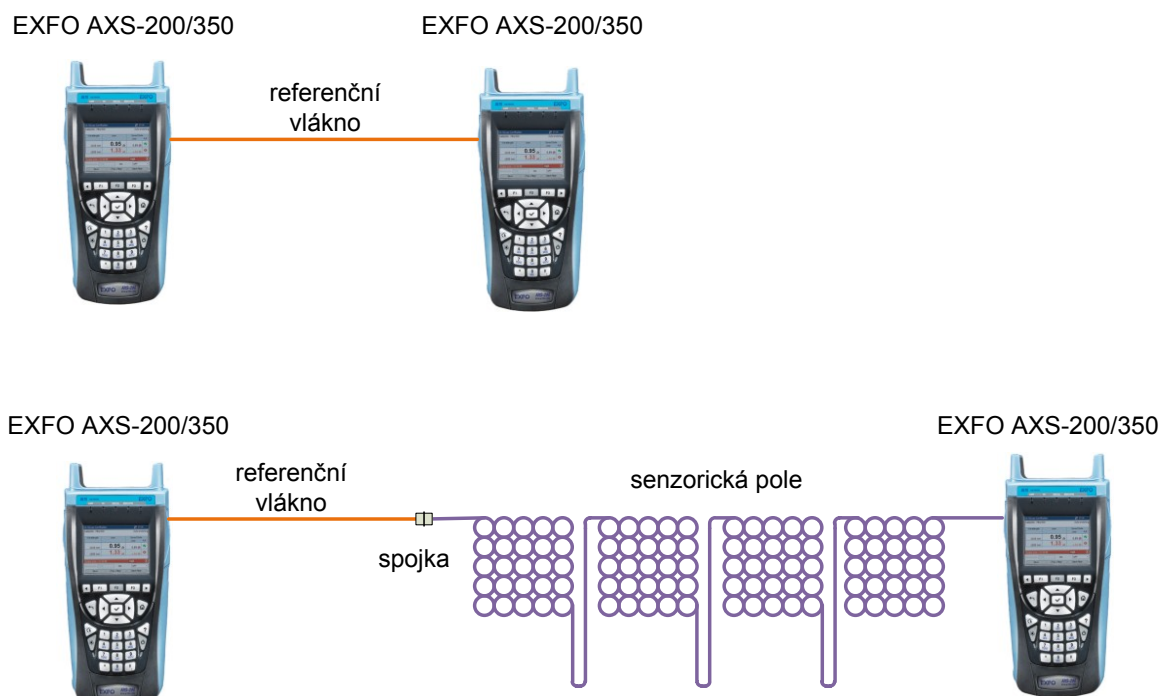
Útlum A (850 nm)	2,016 dB
Útlum A (1300 nm)	1,074 dB

7.3.2. Měření přímou metodou

Touto metodou byl ověřen útlum, který byl měřen pomocí OTDR. V prvním kroku této metody změříme referenci na referenčním vlákně. V tento okamžik se nastaví reference, měřicí přístroj ukazuje útlum 0 dB. Poté se odpojí od měřicího přístroje a do trasy vloží námi měřená meandrová pole viz obr. 29. Změřené hodnoty lze porovnat v tab. 4 a 5.

Tab. 5: Změřený útlum přímou metodou

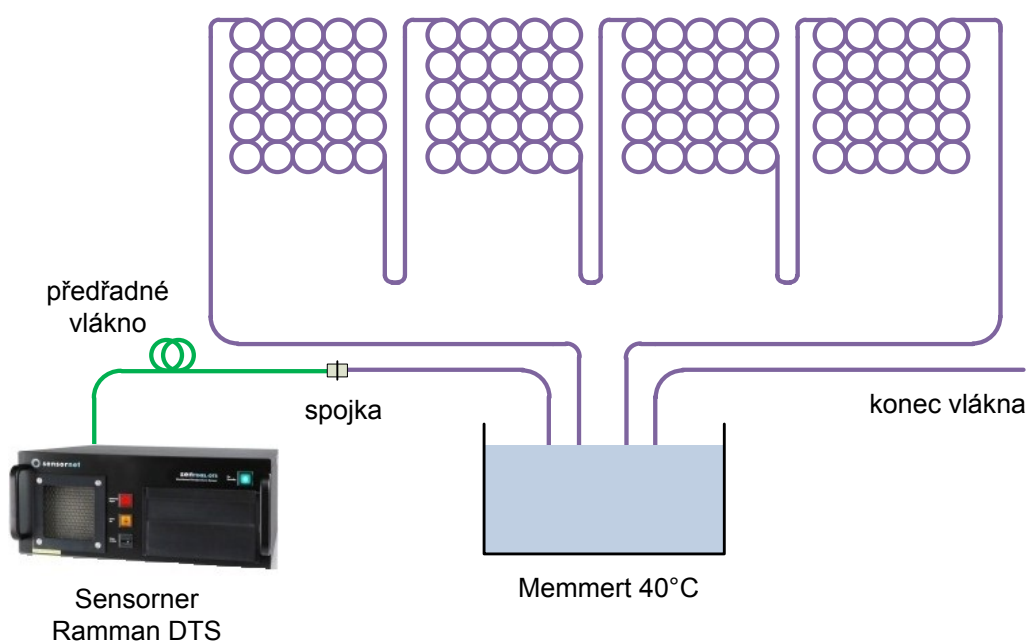
Útlum A (850 nm)	2,43 dB
Útlum A (1300 nm)	1,67 dB



Obr. 29: Měření útlumu přímou metodou.

7.4. Kalibrace Raman DTS

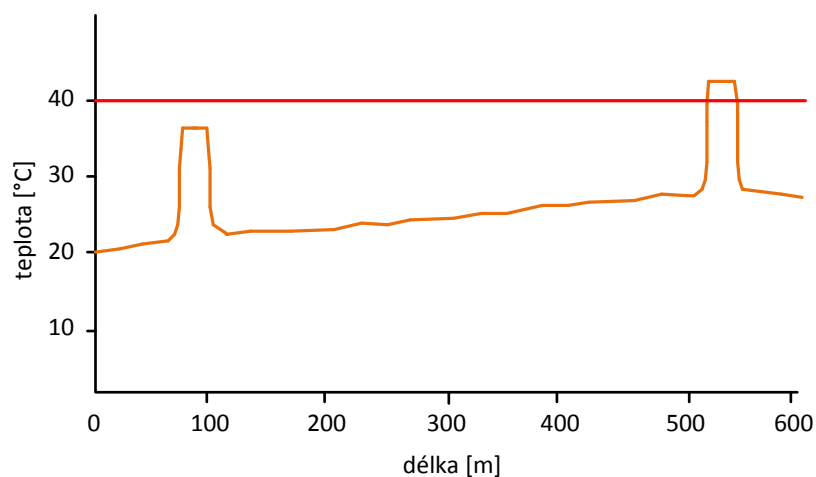
Měření probíhalo na přístroji společnosti Sensornet. Pro správné vyhodnocení teploty je nutné před měřením systém Raman DTS kalibrovat. Kalibrace spočívá v kompenzaci útlumu na optické trase a nastavení správné teploty proti referenci. Schéma zapojení Raman DTS je na obr. 30. Teplota vodní lázně byla udržována na hodnotě $40 \pm 0,5$ °C, teplota okolí byla 25 °C.



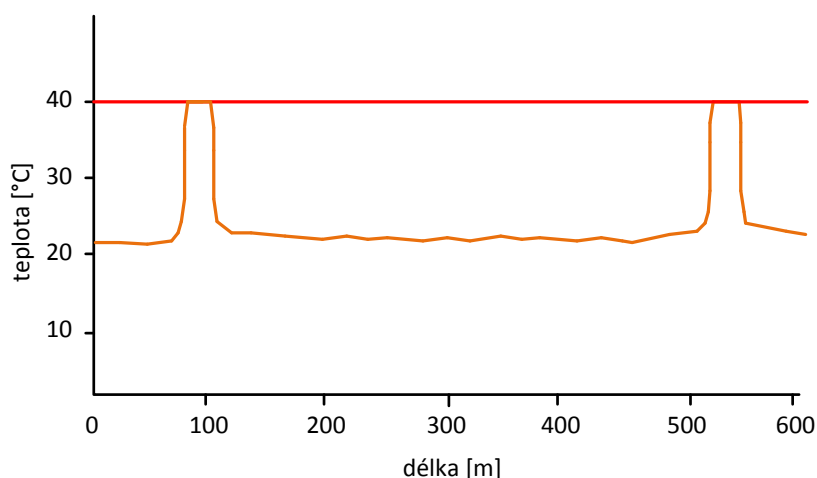
Obr. 30: Kalibrace Raman DTS.

Při nastavování nového měření pomocí průvodce nastavením Senzornet Raman DTS se kompenzuje útlum vlákna. Útlum se zde projevuje jako zvýšení teploty. Po této kompenzaci, kdy je teplotní hladina vyrovnaná, je nutné nastavit teplotní offset, tak aby teplota vodní lázně v Memmert odpovídala změřené teplotě Raman DTS. Stav po kalibraci je patrný na obr. 32.

Během kalibrace je první a poslední meandr ponořen do vodní lázně v přístroji Memmert. Teplotní průběh před kalibrací je patrný na obr. 30.



Obr. 31: Změřená teplota na vlákně před kalibrací.

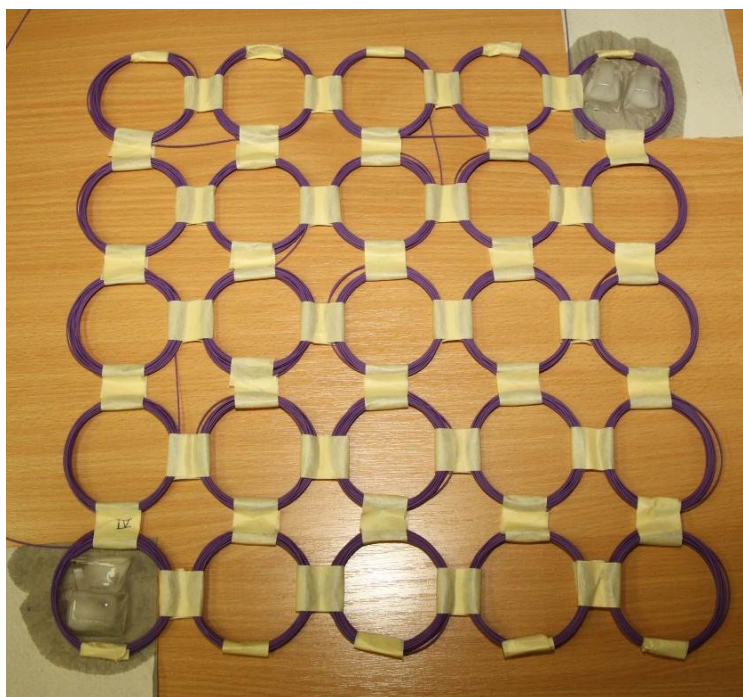


Obr. 32: Změřená teplota na vlákně po kalibraci.

Po kalibraci se profil měření uloží. Při dalším měření již není třeba, při použití stejného předřadného vlákna a zapojení meandrových polí, opět Raman DTS kalibrovat.

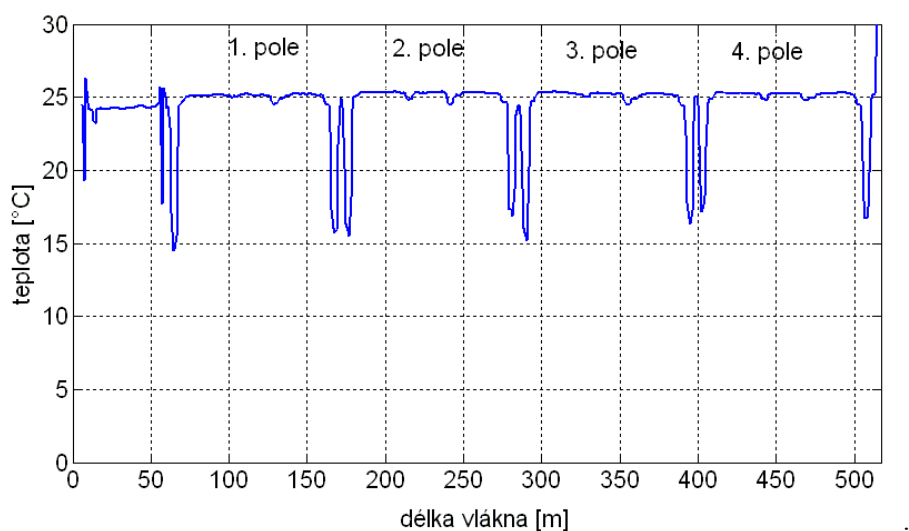
7.5. Kalibrace meandrových polí

Pro správné vyhodnocení teploty v prostoru v senzorickém poli je nutné provést kalibraci. Při této kalibraci je nutné zjistit na jaké délce meandrové pole začíná a na které délce končí.



Obr. 33: Kalibrace délky meandrového pole.

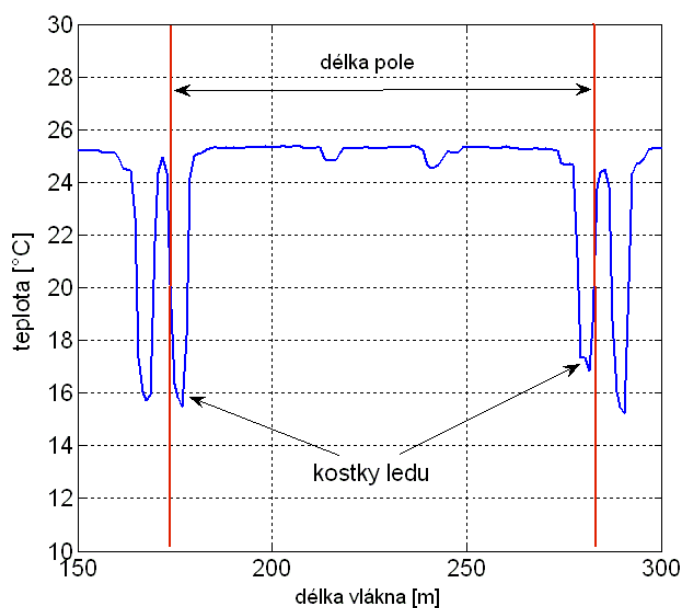
Pro zjištění délky meandrového pole byly na prvním a posledním senzoru na papírový ubrousek u všech meandrových polí umístěny kostky ledu, což způsobí pokles teploty v tomto senzoru.



Obr. 34: Kalibrace délek meandrových polí.

Papírový ubrousek byl umístěn jen pod senzorem tak, aby se nedotýkal ostatních sensorů ve svém okolí. Tímto došlo k oddělení studené vody, která se uvolňovala při tání ledu.

Pokles teplot na prvním a dvacátém pátém senzoru polí je patrný na obr. 34. Na obr. 35 je vykreslen průběh teploty na druhém poli. Nerovnoměrnost v průběhu mezi začátkem a koncem pole je způsobena snížením teploty vzduchu v okolí prvního senzoru. Snížení teploty se projevilo ovlivněním okolních sensorů.



Obr. 35: Kalibrace 2. Pole.

Poklesy teplot prvního a posledního senzoru byly vyhledány v zaznamenaném datovém výstupu. V tomto datovém výstupu byla zaznamenána u každé měřené vzdálenosti od čela vlákna teplota. Prudší pokles teploty na začátku a na konci meandrových polí je zaznamenán v tab. 6. Byly dopočteny délky namotaného vlákna v jednotlivých polích. Délky vlákna v jednotlivých polích jsou si podobné a přiměřené ručnímu navíjení vlákna.

Tab. 6: Délky meandrových polí.

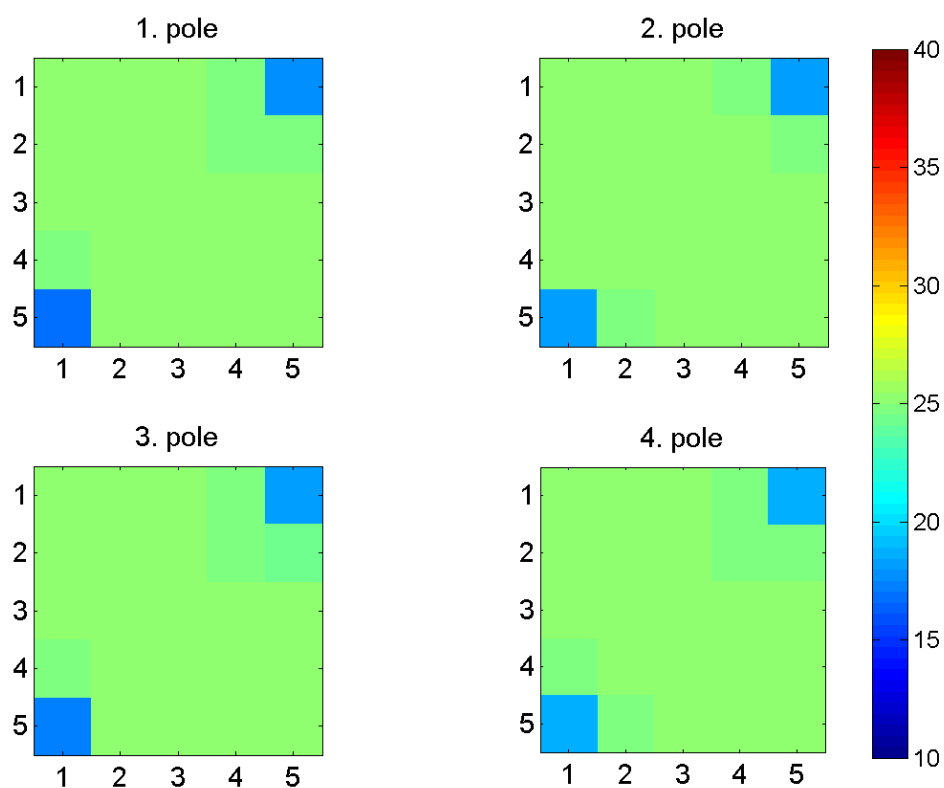
	začátek pole na délce [m]	konec pole na délce [m]	délka vlákna [m]
1. pole	63,130	168,734	105,604
2. pole	174,827	282,461	107,634
3. pole	287,538	396,188	108,650
4. pole	401,265	508,900	107,635

V tab. 7 je zaznamenána změřená teplota při kalibraci s ledem na prvním a posledním senzoru pole. Z naměřených dat je patrný prudký pokles teploty na čtyřech měřených délkách o proti teplotě okolí.

Tab. 7: Kalibrace meandrových polí s ledem.

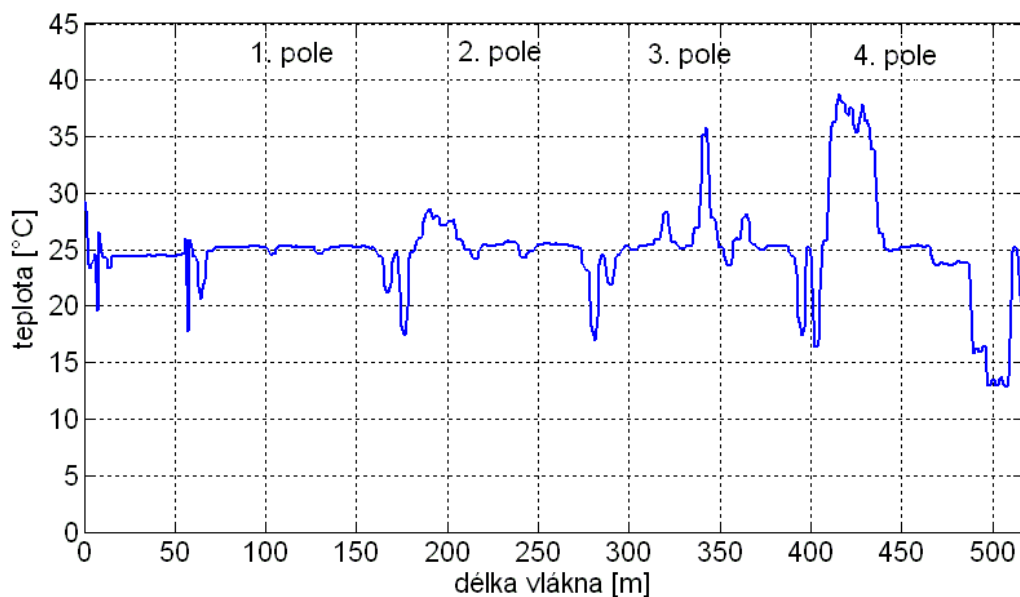
	první senzor v poli		poslední senzor v poli	
	délka [m]	teplota [°C]	délka [m]	teplota [°C]
1. pole	61,100	24,418	163,657	24,451
	62,115	22,948	164,672	22,672
	63,130	17,087	165,688	17,332
	64,146	14,481	166,703	16,056
	65,161	14,612	167,719	15,711
	66,177	15,510	168,734	15,930
	67,192	21,576	169,749	21,763
	68,207	24,373	170,765	24,373
2. pole	172,796	24,354	277,384	24,642
	173,811	20,141	278,399	21,155
	174,827	16,352	279,415	17,338
	175,842	15,853	280,430	17,345
	176,857	15,462	281,446	16,828
	177,873	18,162	282,461	18,671
	178,888	24,147	283,476	23,757
	179,904	25,003	284,492	24,371
3. pole	285,507	24,491	391,111	24,516
	286,523	23,837	392,126	22,434
	287,538	18,748	393,142	17,747
	288,554	16,039	394,157	16,677
	289,569	15,483	395,173	16,350
	290,584	15,212	396,188	17,282
	291,600	20,212	397,203	23,361
	292,615	24,344	398,219	25,013
4. pole	399,234	25,119	503,822	24,454
	400,250	24,475	504,838	23,390
	401,265	19,009	505,853	17,947
	402,281	17,150	506,869	16,735
	403,296	17,635	507,884	16,685
	404,311	18,227	508,900	17,442
	405,327	21,620	509,915	22,165
	406,342	24,624	510,930	24,972

Na obr. 36 je grafický výstup po zpracování programem Matlab. Popis programu je uveden kapitole 9, která se věnuje zpracování změřených dat. Z grafického výstupu je patrná přesná kalibrace polí, kdy senzory, ve kterých byl umístěn led, jsou jasně odděleny od okolí.



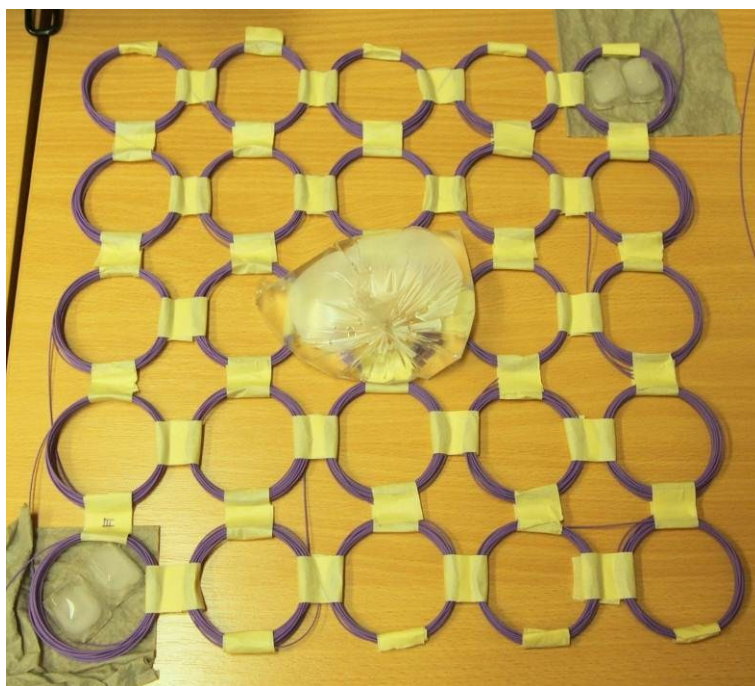
Obr. 36: Kalibrace meandrových polí.

Po kalibraci následoval pokus se zbývajícím ledem a horkou vodou v sáčcích. Tento pokus sloužil k vyzkoušení rozlišení snímané teploty a ovlivnění okolních senzorů. Průběh teploty snímáný na optickém vlákne je na obr. 37.



Obr. 37: Vyhodnocení s ledem a horkou vodou v sáčcích.

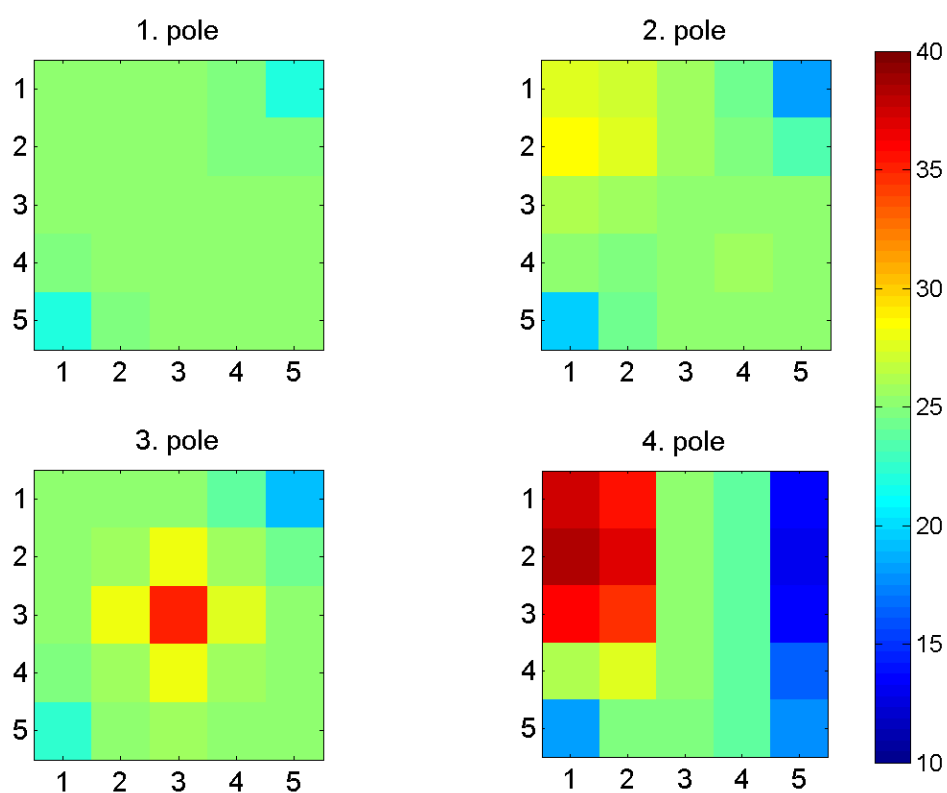
Začátek 2. pole byl ovlivněn z předchozího pokusu, když byly na čtyřech senzorech v horním levém rohu umístěny sáčky s horkou vodou. Pokus probíhal na 3. a 4. poli. Ve třetím poli byl umístěn sáček s horkou vodou na prostřední meandr obr. 38. Ve čtvrtém poli byl na pravý sloupec umístěn zbývající led. Do levého horního rohu byly umístěny sáčky s horou vodou (obr. 39). Grafický výstup z programu Matlab je na obr. 40. Na 3. poli je patrné ovlivnění okolních senzorů, které bylo způsobeno dotykem sáčku s horkou vodou a okolních senzorů ve vodorovné a svislé ose.



Obr. 38: Pokus 3. pole.



Obr. 39: Pokus 4. pole.



Obr. 40: Zkoušky vyhodnocení s ledem a horkou vodou v sáčcích.

Jak je z obr. 36 a obr. 40 patrné, tak je rozlišitelnost v prostoru na senzoričtém poli velmi přesná a pro měření teploty při hydrataci betonu vyhovující.

8. Experimentální ověření v praxi

Experimentální ověření probíhalo v laboratoři stavebních hmot na fakultě stavební VŠB-TUO. Pro měření byla zkonstruována preforma, která byla zevnitř vyplněna polystyrénem o tloušťce 5 cm. Vnitřní rozměr preformy je $40 \times 40 \times 40$ cm obr. 41. Polystyrénové desky byly pro snadnější odstranění obaleny folií.



Obr. 41: Preforma.

Podle receptury v tab. 9 byl v laboratorní míchačce namíchán beton.

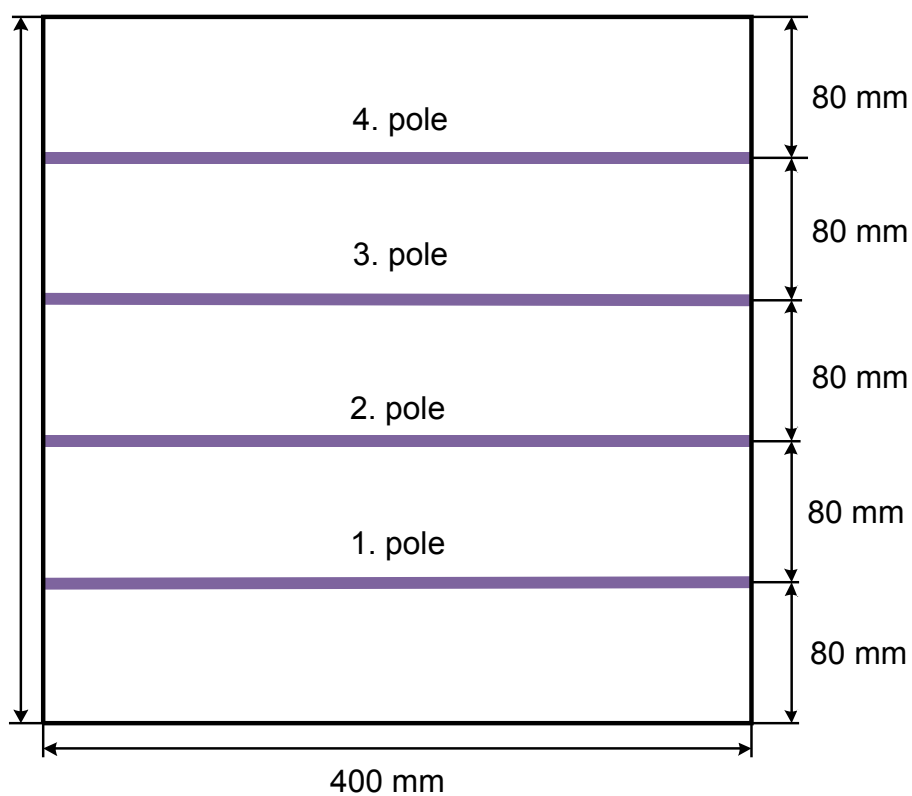
Tab. 8: Návrh celkové receptury

Cement	52,5 R Hranice	420 kg
Voda		150 kg
Kamenivo	0 - 4 mm	880 kg
	4 - 8 mm	150 kg
	8 - 16 mm	720 kg
Přísady	plastifikátor	4 kg
	provzdušnění	0 kg
Objem čerstvého betonu		2324 kg/m ³

Tab. 9: Receptura pro objem 35 litrů.

Cement	52,5 R Hranice	14,70 kg
Voda		5,25 kg
Kamenivo	0 - 4 mm	30,80 kg
	4 - 8 mm	5,25 kg
	8 - 16 mm	25,00 kg
Přísady	plastifikátor	0,14 kg
	provzdušnění	0,00 kg
Objem čerstvého betonu		81,34 kg

Preforma byla ve své výšce okótována jako na obr. 42. Na dno preformy byla nanесena první vrstva betonu. Na tuto vrstvu betonu bylo posléze položeno první meandrové pole obr. 43.



Obr. 42: Umístění meandrových polí v preformě



Obr. 43: Betonování prvního pole.

Na první pole byla opět nanесena vrstva betonu a na ni bylo opět položeno další meandrové pole. Postup se opakoval až do zabetonování všech polí. Po zabetonování všech polí se na poslední vrstvu betonu umístila polystyrenová deska. Bylo připojeno optické vlákno k Raman DTS. Změřené hodnoty se zaznamenávaly do souborů.



Obr. 44: Betonování posledního pole

9. Zpracování naměřených dat programem Matlab

Měřené údaje se ukládaly do souborů v intervalu 5 minut. Měření probíhalo 10 dní. Za tuto dobu se provedlo celkem 2958 měření. Byl proveden výběr měření pro interval 30 a 60 minut. Měření v intervalu 30 minut odpovídá 491 měření. Pro interval 60 minut je to 246 měření. Pro snadnější práci programu byly vybrané soubory pomocí programu Winsome File Renamer přejmenovány od 1 do 491, respektive od 1 do 246. Přejmenování umožňuje práci se soubory jako s inkrementující se proměnnou. Vybrané soubory jsou součástí přílohy ve složce data_60 a data_30.

Pro zpracování dat byl použit program Matlab ve verzi R2010a. Byl napsán skript, který pracuje ve smyčkách tak, že se změřená data zpracovávají automaticky. Skript je rozdělen na několik částí a to na hlavní skript a na podskripty, do kterých odkazuje. Skript je součástí přílohy. Případná modifikace pro použití při jiném rozlišení meandrových polí je možná modifikací tohoto skriptu.

9.1. Načtení dat

Na začátku skriptu jsou načtena data z prvního souboru 1.ddt. Proměnná P se po každém průchodu programu inkrementuje od 1 do 246. V další smyčce je zpracován další soubor.

```
% nacteni dat
for P=1:246; %data60 max=246disp('- nacitam data');
clear moje_data % smaže již načtená data
soubor = sprintf('data30/%d.ddf', P); % data30, data60, data_lab
cislo = sprintf('%d', P);
%moje_data = nacti_soubor('data/1.ddf'); % zde se načítají data
moje_data = nacti_soubor(soubor);
disp([' pocet radku dat: ' int2str(size(moje_data,1))]); % počet řádků
```

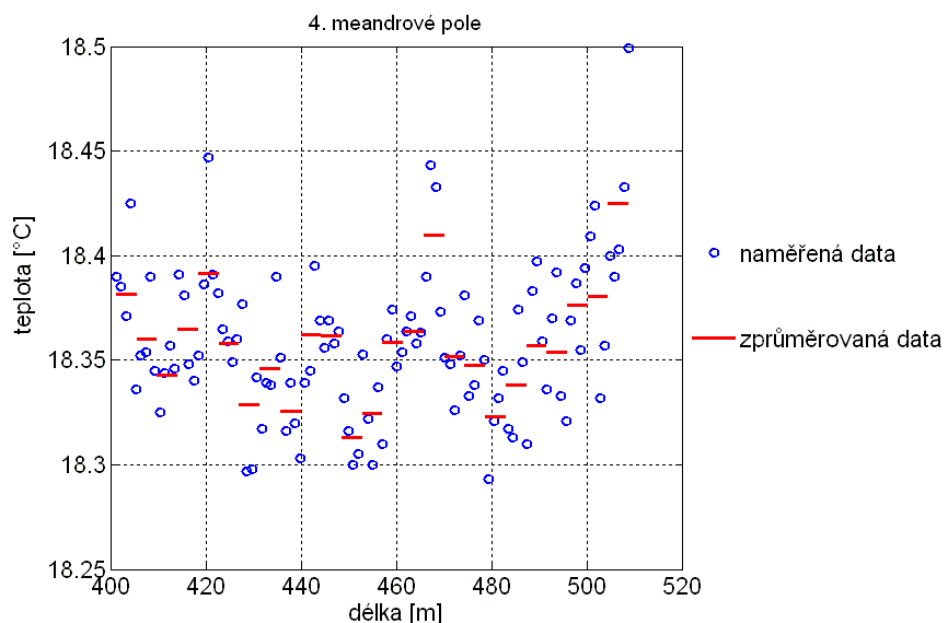
9.2. Definování délky polí a zpracování dat

Při kalibraci byly zjištěny začátky a konce polí, viz tab. 6.

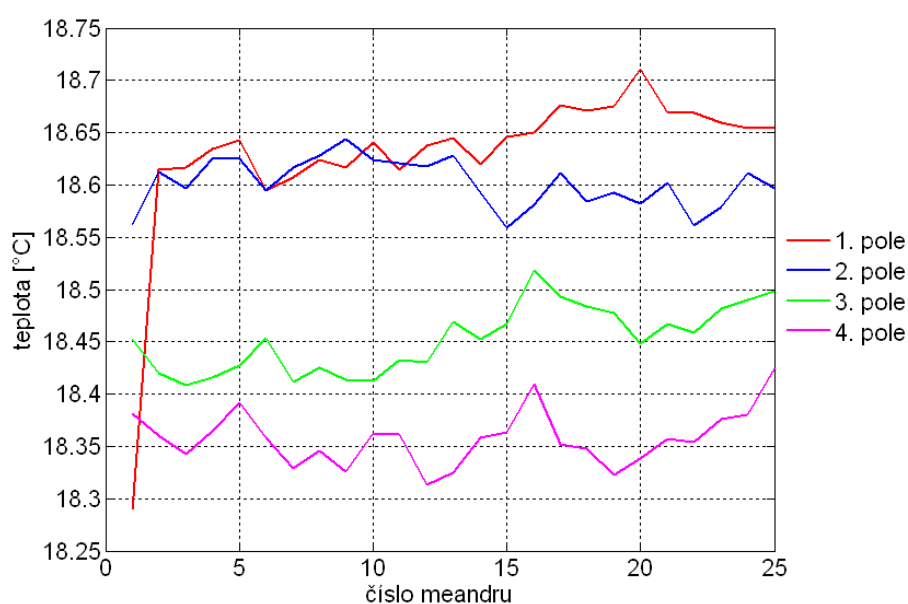
```
% definovani jednotlivych meandrovych polí - nutno zadat ručně
zacatek_konec_pole = []; % pole zacatku a koncu meandrovych polí
% pocet polí určuje pocet řádků tohoto pole
zacatek_konec_pole(1,:) = [63.13, 168.734]; % 1. pole [zacatek,konec]
zacatek_konec_pole(2,:) = [174.827, 282.461]; % 2. pole [zacatek,konec]
zacatek_konec_pole(3,:) = [287.538, 396.188]; % 3. pole [zacatek,konec]
zacatek_konec_pole(4,:) = [401.265, 508.9]; % 4. pole [zacatek,konec]
pocet_meandru_v_polí = 25; % toto je pocet meandru v polí
```

Modifikací počtu řádků `zacatek_konec_pole` a `pocet_meandru_v_poli`, kde předpokládáme, že meandrové pole je rozměr čtverce. Program lze modifikovat pro jiný počet polí, i pro pole o jiném počtu senzorů.

Po definování délky polí se data v jednotlivých polích rozdělí na jednotlivé meandry. Data na jednotlivých meandrech se zprůměrují. Sečtou se změřené teploty na délkách vlákna v jednom meandru a ty se následně vydělí počtem těchto délek. Vykreslí se grafy zprůměrovaných a naměřených dat obr. 46. Vykreslí se teplota v jednotlivých polích.



Obr. 45: Vykreslení naměřených a zprůměrovaných dat.

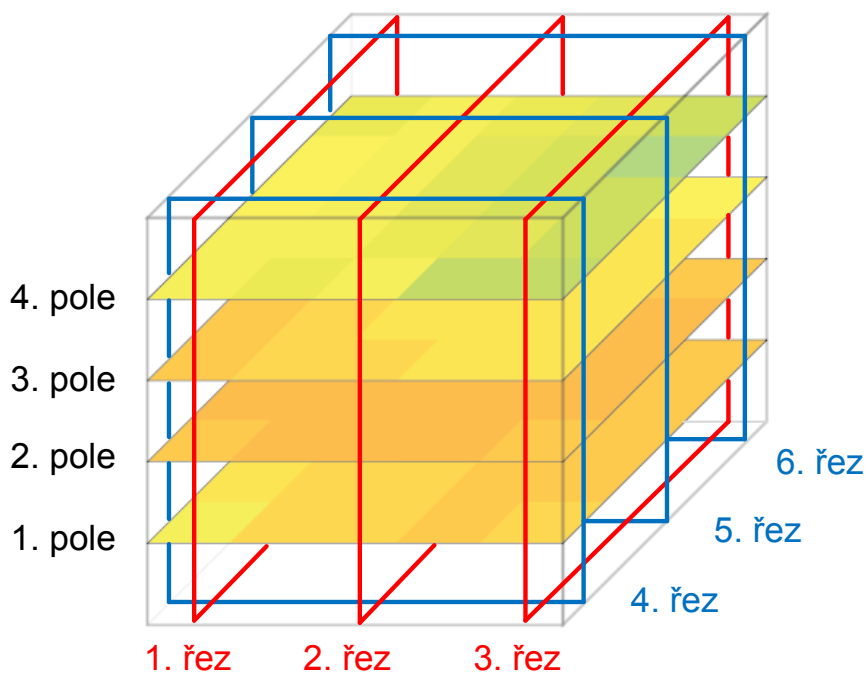


Obr. 46: Vykreslení teploty na jednotlivých polích.

Zprůměrovaná data ze senzorů se zapíše ve formě „hada“ do matice, která má 5 sloupců a 5 řádků. Zapisuje se po sloupcích, sudé sloupce 2 a 4 jsou převráceny svisle tak, aby data v matici odpovídala meandrům v poli. Matice jsou ukládány do datového souboru `data_matice`. Tento soubor obsahuje všechny matice, se kterými program pracuje.

9.3. Řezy matic

Pro lepší analýzu změřených dat jsem vykresloval změřená data i v řezech. Pro zpracování jsem si napsal část skriptu pro definování matice řezu z již vytvořených matic.



Obr. 47: Řezy maticemi.

```
%řez 1
matice_pole{5}=[(matice_pole{4}(:,1))';(matice_pole{3}(:,1))'];
matice_pole{2}(:,1)';(matice_pole{1}(:,1))']];
```

Z kódu je patrné, že první řádek matice se rovná prvnímu sloupci z matice čtvrtého pole. Druhý řádek matice je roven prvnímu sloupci matice třetího pole. Třetí řádek matice je roven prvnímu sloupci matice druhého pole. Čtvrtý řádek matice je roven prvnímu sloupci matice prvního pole.

Řezy maticemi jsou uloženy do souboru `data_matice`. `data_matice{P,1}`, to znamená P řádek a první sloupec. Proměnná P se po každém průchodu programu zvyšuje o 1 a tak se nová data zapisují vždy na další řádek. V prvním sloupci jsou postupně ukládány matice ze všech měření.

```

data_matice{P,1}= matice_pole{1,1}; %uložena matice 1. pole
data_matice{P,2}= matice_pole{1,2}; %uložena matice 2. pole
data_matice{P,3}= matice_pole{1,3}; %uložena matice 3. pole
data_matice{P,4}= matice_pole{1,4}; %uložena matice 4. pole
data_matice{P,5}= matice_pole{1,5}; %uložen 1. řez
data_matice{P,6}= matice_pole{1,6}; %uložen 2. řez
data_matice{P,7}= matice_pole{1,7}; %uložen 3. řez
data_matice{P,8}= matice_pole{1,8}; %uložen 4. řez
data_matice{P,9}= matice_pole{1,9}; %uložen 5. řez
data_matice{P,10}= matice_pole{1,10}; %uložen 6. řez

```

9.4. Vykreslení a uložení dat

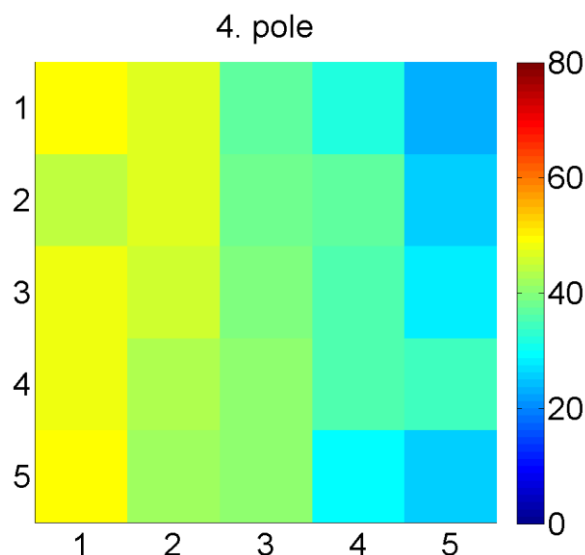
Po uložení dat všech matic zbývá změřená data vykreslit. Pro svou názornost byla použita funkce `imagesc`, která je obsažena v Matlabu. Teplota je vykreslena do obrázku. Barva je přiřazena z definovaného intervalu 0 až 80 °C a odpovídá změřené teplotě v matici.

9.4.1. Vykreslení a uložení jedné matice

```

%pole4
imagesc(data_matice{P,4})
axis image; %nastaví osy v poměru 1:1
colorbar; %zobrazí colorbar
caxis([0 80]); %min max teploty v colorbar
title('4. pole','FontSize',24);
set(gca,'YDir','reverse','FontSize',24);
saveas(1,sprintf('img/pole_4_mereni_%d',P),'png'); %uložení
disp('- ukládám 4. pole');
close;

```



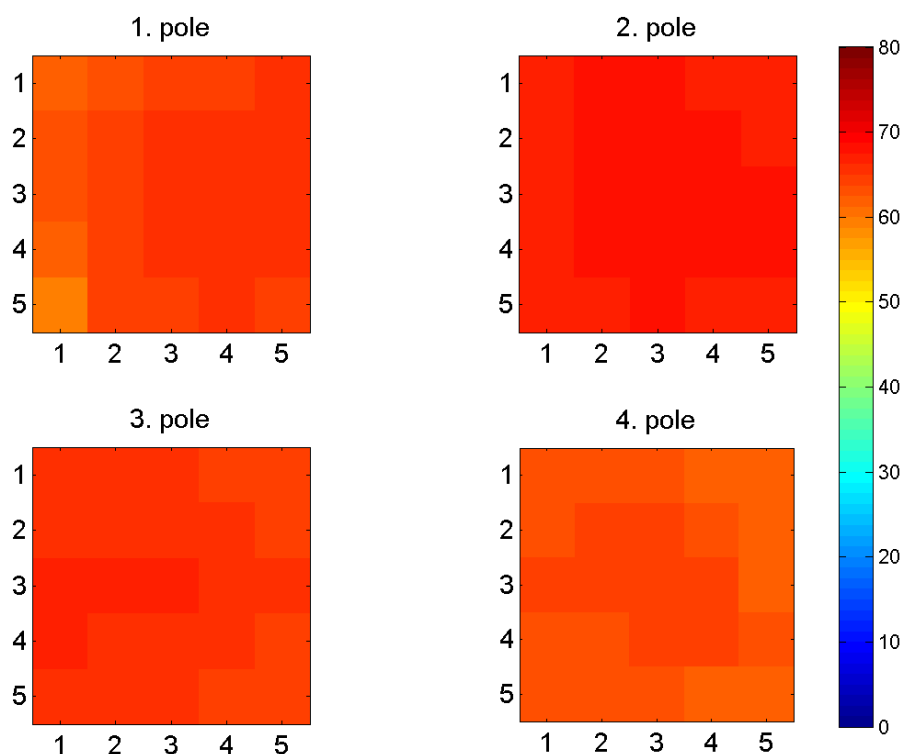
Obr. 48: Vykreslení teploty matice 4. pole.

9.5. Vykreslení a uložení matic všech polí do jednoho souboru

Z kódu programu je patrné, že se postupně vykreslují jednotlivé grafy do souboru obdobně jako při vykreslení a uložení obrázku z jedné matice.

```
% subplot grafy
figure
%pole1
subplot1 = subplot(2,2,1);
imagesc (data_matice{P,1});
title('1. pole', 'FontSize',14);
set(gca, 'YDir', 'reverse', 'FontSize',14, 'DataAspectRatio',[1 1 1]);
axis image;
caxis([0 80]);
box(subplot1, 'on');
hold(subplot1, 'all');
% %pole2
% subplot2 = subplot(2,2,2);
% imagesc (data_matice{P,2});
% title('2. pole', 'FontSize',14);
% set(gca, 'YDir', 'reverse', 'FontSize',14);
% axis image;
% caxis([10 40]);
% box(subplot2, 'on');
% hold(subplot2, 'all');
%
%pole3
subplot3 = subplot(2,2,3);
imagesc (data_matice{P,3});
title('3. pole', 'FontSize',14);
set(gca, 'YDir', 'reverse', 'FontSize',14);
axis image;
caxis([0 80]);
box(subplot3, 'on');
hold(subplot3, 'all');
%
%pole4
subplot4 = subplot(2,2,4);
imagesc (data_matice{P,4});
title('4. pole', 'FontSize',14);
axis image;
set(gca, 'YDir', ...
    'reverse', ...
    'FontSize',14, ...
    'Position',[0.569184839726749 0.113623188405797 0.334659090909091
0.330217391304348]);
axis image;
caxis([0 80]);
box(subplot4, 'on');
hold(subplot4, 'all');
%
B=colorbar;
set(B, 'position',[0.901599461429533 0.106105852777918 0.0305404624277488
0.822881341634189], 'FontSize',12);
%
saveas(1, sprintf('img/subplot_mereni_%d', P), 'png');
disp('- ukládám subplot');
close ;
```

Vykreslení teploty všech polí je na obr. 40 a 49.



Obr. 49: Maximální teplota po třiceti hodinách po zamíchání betonu.

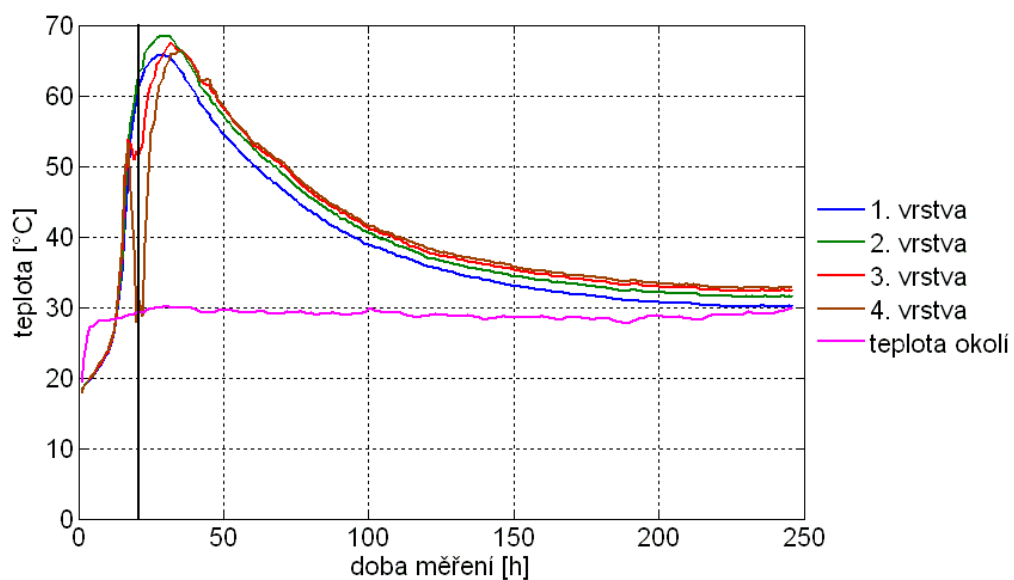
9.5.1. Vykreslení teploty polí

Pro vykreslení teploty byly postupně ukládány teploty z prostředního senzoru v poli a z délky předřadného vlákna do datového souboru y.

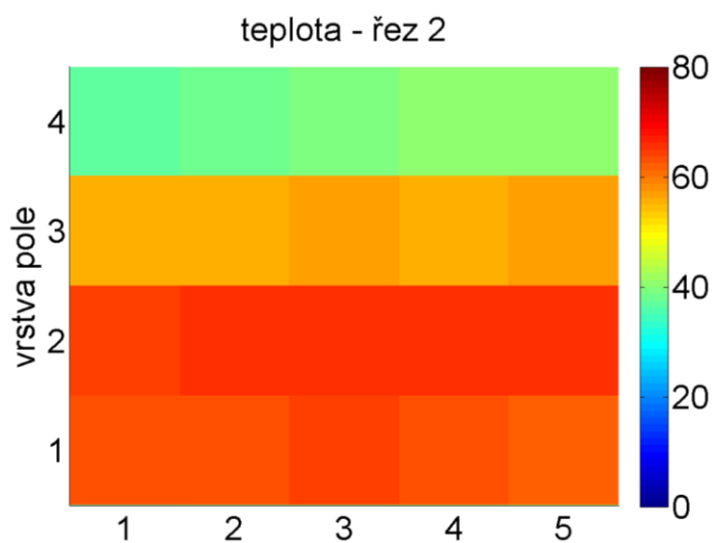
```
y(P,1)=matice_pole{1,1}(3,3);
y(P,2)=matice_pole{1,2}(3,3);
y(P,3)=matice_pole{1,3}(3,3);
y(P,4)=matice_pole{1,4}(3,3);
y(P,5)=moje_data(41,2);
```

Z grafu na obr. 50 je znatelný nárůst teploty. Teplota betonu dosahuje maxima po třiceti hodinách v druhé vrstvě 68,56 °C. Náběh teploty v jednotlivých vrstvách je posunut. Příčinou je malá časová prodleva mezi betonováním a umístěním polí.

Z grafu lze vyčíst, že se teplota okolí pohybovala v přetopené místnosti okolo 30 °C. Měření probíhalo v polovině února. Tato teplota odpovídá teplotám horkých letních měsíců.



Obr. 50: Teplota prostředního senzoru ve vrstvách.



Obr. 51: Teplota v řezu po 23 hodinách.

10. Závěr

V této diplomové práci byla popsána problematika implementace optovláknových DTS na bázi Ramanova stimulovaného rozptylu ve stavebním průmyslu, respektive měření teploty hydratace v betonu.

Z naměřených hodnot vyplívá, že tato metoda měření je velice přesná a je schopná měřit teplotu hydratace betonu v celém prostoru. Příkladem mohou být naměřené rozdílné teploty v jednotlivých vrstvách. Jak ukázalo měření, teplota v betonu není homogenní a je závislá na okolí. Příkladem může být vykreslení teploty na obr. 48 a obr. 51.

Teplota v řezu je na obr. 51. Ve 3. a 4. vrstvě dochází k úniku vzniklého tepla přes polystyrenovou desku do okolí. V 1. a 2. vrstvě se tento pokles teploty mezi chemickými reakcemi neprojevuje a to z důvodu vlastní izolace betonu, přes které uvolněné teplo z nižších vrstev proniká do okolí mnohem pomaleji.

Měření teploty na 4. poli vykazovalo značnou nesouměrnost. Nesouměrnost byla způsobena nedokonalostí těsnění vrchní polystyrenové desky, kdy v tomto místě docházelo vzniklou mezerou k unikům tepla. Únik tepla se jasně projevil poklesem teploty betonu v pozorované vrstvě.

Byla změřena anomálie, která nastala po 23 hodinách po zamíchání betonu (obr. 50). Pokles teploty, který je patrný ve 3. a 4. vrstvě. Tato anomálie je způsobena dvěma odlišnými reakcemi. První je reakce vody a cementu. Druhá je reakcí cementu a plastifikátoru. Tento průběh odpovídá průběhu uvolňování normalizovaného tepla, který je měřen kalorimetrem obr. 1 a obr. 2.

Tato práce ukázala snadnou implementaci aplikace Raman DTS do stavebního průmyslu pro sledování teploty hydratace betonu ve velkém vzorku. Tento postup měření v prostoru a čase je v takto velkém vzorku mnohem komplexnější a přináší nový pohled na měření teploty hydratace v betonu, než měření hydratačního tepla pomocí kalorimetru, kdy se srovnávají jen velmi malé vzorky cementů, vody a plastifikátoru bez kameniva. Při použití jiné preformy a izolace by se takto daly monitorovat teploty v libovolně velkém bloku nebo vzorcích anebo přímo na stavbě v měřitelném dosahu Raman DTS.

Problematika optovláknových DTS a betonu je velice obsáhlá a mohlo by se jí zabývat několik dalších prací. Například by se mohla sledovat změna teploty při simulaci požáru tak, aby byl beton a senzory v něm využity i při dalších měřeních.

Literatura

- [1] GRATTAN, K. T. V., SUN, T.: Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators* 82, 2000
- [2] LEE, B.: Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology* 9, (2003).
- [3] LOPÉZ-HIGUERA, J. M.: Handbook of optical fibersensing technology. John Wiley and sons, Ltd. (2002), ISBN 0-471-82053-9.
- [4] YOSHIDA, K., et al.: Loss factors in optical fibres. *Optical and Quantum Electronics*. 1981, 13, 1, s. 85-89. ISSN 0306-8919.
- [5] BALL, D. W.: Theory of Raman Spectroscopy. *Spectroscopy* [online]. 2001. Dostupný z WWW: <<http://spectroscopyonline.findanalytichem.com>>. ISSN 0887-6703.
- [6] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonů*. Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTUM, 2000, 317 s., ISBN 80-214-1647-5.
- [7] STASTNIK, S., Modelování nestacionárního 3D-teplotního pole v železobetonových konstrukcích, *Betonářské dny 2002*, ČBS, Pardubice 2002, ISBN 80-238-9644-X
- [8] GRATTAN, K. T. V., MEGGITT, B. T.: Optical Fiber Sensors Technology. Vols. 1-5, Kluwer Academic Publishing, London, UK, (1998-2000).
- [9] DONLAGIC, D., LESIC, M.: All-fiber quasi-distributed polarimetric temperature sensor. *Optics Express* Vol. 14, NO. 22 (2006).
- [10] LONG, D. A.: The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules. 1. Edition. England: John Wiley & Sons, April 2002. 598 p. s. ISBN 978-0-471-49028-9, DOI: 10.1002/0470845767.
- [11] JAASKELAINEN, M.: Distributed Temperature Sensing (DTS) in Geothermal Energy Applications [online]. c 2009, poslední aktualizace 1. 9. 2009. Dostupné z WWW: <<http://www.sensorsmag.com/specialty-markets/utilities/distributed-temperature-sensing-dts-geothermal-energy-applic-5866>>
- [12] PELLI, S., et al.: Spectroscopic Techniques For Sensors. In RIGHINI, Giancarlo C.; TAJANI, Antonella; CUTOLO, Antonello. *Optics and Photonics: An Introduction To Optoelectronic Sensors*. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009. s. 584. ISBN 978-981-283-412-6.

-
- [13] Sensornet. Sentinel DTS product range. Hertfordshire, UK, 2012. Dostupný z WWW: <http://www.sensornet.co.uk/download.cfm?type=document&document=169>>
- [14] BEJČEK, L.: Vláknová optika v řídicí a měřicí technice, FEKT VUT Brno, 2002 (neveřejný text)
- [15] KOUDELKA, Petr, Jan LÁTAL, Jan VITÁSEK, Jan HURTA, Petr ŠIŠKA a David HRUBÝ. Implementace optických meandrů optovláknového DTS na bázi Ramanova stimulovaného rozptylu do stavebních procesů. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2012, 10, 2 ISSN 1804-3119.
- [16] JASKELAINEN, Mikko. Distributed Temperature Sensing (DTS) in Geothermal Energy Applications. *Spectroscopy* [online]. 2009, Dostupný z WWW: <<http://www.sensorsmag.com/specialty-markets/utilities/distributed-temperature-sensing-dts-geothermal-energy-applic-5866>>. ISSN 0746-9462.
- [17] Mathworks. MATLAB - Documentation. Ottawa : Optiwave, 2012. [online], Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/techdoc/>>
- [18] BOHÁČ, L.: Přednášky k předmětu Optické komunikace [online], Dostupné z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=1935>>
- [19] ITU-T: G.651: Characteristics of a 50/125 mm multimode graded index optical fibre cable [online]. 1998. Dostupné z WWW: <<http://202.114.9.3/xueke/wldz/bz/g/2.pdf>>
- [20] MATĚJKA, P.: Ramanova spektrometrie [online]. 2008. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/anl/lach2/RAMAN.pdf>>

Seznam obrázků

Obr. 1: Závislost vývinu normalizovaného tepelného toku v čase.	7
Obr. 2: Závislost vývinu tepla v čase.	7
Obr. 3: Bodový senzor.	9
Obr. 4: Integrovaný senzor.	9
Obr. 5: Distribuovaný senzor.	9
Obr. 6: Kvazi-distribuovaný senzor.	9
Obr. 7: Ramanovo spektrum rozptýleného záření [5].	13
Obr. 8: Vznik a zánik fotonu.	14
Obr. 9: Rozptýlené světlo v optickém vlákně.	16
Obr. 10: Blokové zapojení Raman DTS.	17
Obr. 11: Energetické stavy fotonů [13].	18
Obr. 12: Meandry z optického vlákna o průměru 6 cm.	22
Obr. 13: Závislost změřené teploty na délce vlákna v meandru.	23
Obr. 14: Závislost změřené teploty na délce vlákna v meandru.	23
Obr. 15: Umístění prvního senzoru při měření ve vodní lázni.	24
Obr. 16: Vlákno s těsnou sekundární ochranou o vnějším průměru 900 μm .	25
Obr. 17: Vlákno s těsnou sekundární ochranou o vnějším průměru 900 μm .	25
Obr. 18: Vlákno pouze s těsnou primární ochranou průměru 250 μm .	26
Obr. 19: Vlákno pouze s těsnou primární ochranou průměru 250 μm .	26
Obr. 20: Rozložení senzorů v meandrovém poli.	28
Obr. 21: Namotávání meandrů pro pole o rozlišení 8×8 .	28
Obr. 22: Kompletní meandrové pole o rozlišení 8×8 .	29
Obr. 23: Šablona pro meandrové pole.	30
Obr. 24: Navíjení sensorů na šablonu.	30
Obr. 25: Přelepení pole v druhé ose.	31
Obr. 26: Kompletní meandrové pole.	32
Obr. 27: Schéma zapojení měření útlumu trasy pomocí OTDR..	32
Obr. 28: Útlum trasy změřený pomocí OTDR.	33
Obr. 29: Měření útlumu přímou metodou.	34

SEZNAM OBRÁZKŮ	56
Obr. 30: Kalibrace Raman DTS.	34
Obr. 31: Změřená teplota na vlákně před kalibrací.	35
Obr. 32: Změřená teplota na vlákně po kalibraci.	35
Obr. 33: Kalibrace délky meandrového pole.	36
Obr. 34: Kalibrace délek meandrových polí.	36
Obr. 35: Kalibrace 2. Pole.	37
Obr. 36: Kalibrace meandrových polí.	39
Obr. 37: Vyhodnocení s ledem a horkou vodou v sáčcích.	40
Obr. 38: Pokus 3. pole.	40
Obr. 39: Pokus 4. pole.	41
Obr. 40: Zkoušky vyhodnocení s ledem a horkou vodou v sáčcích.	41
Obr. 41: Preforma.	42
Obr. 42: Umístění meandrových polí v preformě	43
Obr. 43: Betonování prvního pole.	44
Obr. 44: Betonování posledního pole	44
Obr. 45: Vykreslení naměřených a zprůměrovaných dat.	46
Obr. 46: Vykreslení teploty na jednotlivých polích.	46
Obr. 47: Řezy maticemi.	47
Obr. 48: Vykreslení teploty matice 4. pole.	48
Obr. 49: Maximální teplota po třiceti hodinách po zamíchání betonu.	50
Obr. 50: Teplota prostředního senzoru ve vrstvách.	51
Obr. 51: Teplota v řezu po 23 hodinách.	51

Seznam tabulek

Tab. 1: Druhy cementu [6].	3
Tab. 2: Hydratační tepla slínkových nerostů [7].	4
Tab. 3: Obsah vzorků.....	6
Tab. 4: Změřený útlum OTDR.....	33
Tab. 5: Změřený útlum přímou metodou	33
Tab. 6: Délky meandrových polí.....	37
Tab. 7: Kalibrace meandrových polí s ledem.	38
Tab. 8: Návrh celkové receptury	42
Tab. 9: Receptura pro objem 35 litrů.	43

Seznam příloh na DVD

- I změřená data Sensornet Raman DTS
- II vygenerované obrázky programem Matlab
- III software pro přejmenování souboru Trial verze Winsome File Renamer 7.1
- IV skripty Matlab
- V fotografie
- VI grafy zpracované v programu Matlab